This is a digital copy of a book that was preserved for generations on library shelves before it was carefully scanned by Google as part of a project to make the world's books discoverable online.

It has survived long enough for the copyright to expire and the book to enter the public domain. A public domain book is one that was never subject to copyright or whose legal copyright term has expired. Whether a book is in the public domain may vary country to country. Public domain books are our gateways to the past, representing a wealth of history, culture and knowledge that's often difficult to discover.

Marks, notations and other marginalia present in the original volume will appear in this file - a reminder of this book's long journey from the publisher to a library and finally to you.

Usage guidelines

Google is proud to partner with libraries to digitize public domain materials and make them widely accessible. Public domain books belong to the public and we are merely their custodians. Nevertheless, this work is expensive, so in order to keep providing this resource, we have taken steps to prevent abuse by commercial parties, including placing technical restrictions on automated querying.

We also ask that you:

+ *Make non-commercial use of the files* We designed Google Book Search for use by individuals, and we request that you use these files for personal, non-commercial purposes.
+ *Refrain from automated querying* Do not send automated queries of any sort to Google's system: If you are conducting research on machine translation, optical character recognition or other areas where access to a large amount of text is helpful, please contact us. We encourage the use of public domain materials for these purposes and may be able to help.
+ *Maintain attribution* The Google "watermark" you see on each file is essential for informing people about this project and helping them find additional materials through Google Book Search. Please do not remove it.
+ *Keep it legal* Whatever your use, remember that you are responsible for ensuring that what you are doing is legal. Do not assume that just because we believe a book is in the public domain for users in the United States, that the work is also in the public domain for users in other countries. Whether a book is still in copyright varies from country to country, and we can't offer guidance on whether any specific use of any specific book is allowed. Please do not assume that a book's appearance in Google Book Search means it can be used in any manner anywhere in the world. Copyright infringement liability can be quite severe.

About Google Book Search

Google's mission is to organize the world's information and to make it universally accessible and useful. Google Book Search helps readers discover the world's books while helping authors and publishers reach new audiences. You can search through the full text of this book on the web at `http://books.google.com/`

A propos de ce livre

Ceci est une copie numérique d'un ouvrage conservé depuis des générations dans les rayonnages d'une bibliothèque avant d'être numérisé avec précaution par Google dans le cadre d'un projet visant à permettre aux internautes de découvrir l'ensemble du patrimoine littéraire mondial en ligne.

Ce livre étant relativement ancien, il n'est plus protégé par la loi sur les droits d'auteur et appartient à présent au domaine public. L'expression "appartenir au domaine public" signifie que le livre en question n'a jamais été soumis aux droits d'auteur ou que ses droits légaux sont arrivés à expiration. Les conditions requises pour qu'un livre tombe dans le domaine public peuvent varier d'un pays à l'autre. Les livres libres de droit sont autant de liens avec le passé. Ils sont les témoins de la richesse de notre histoire, de notre patrimoine culturel et de la connaissance humaine et sont trop souvent difficilement accessibles au public.

Les notes de bas de page et autres annotations en marge du texte présentes dans le volume original sont reprises dans ce fichier, comme un souvenir du long chemin parcouru par l'ouvrage depuis la maison d'édition en passant par la bibliothèque pour finalement se retrouver entre vos mains.

Consignes d'utilisation

Google est fier de travailler en partenariat avec des bibliothèques à la numérisation des ouvrages appartenant au domaine public et de les rendre ainsi accessibles à tous. Ces livres sont en effet la propriété de tous et de toutes et nous sommes tout simplement les gardiens de ce patrimoine. Il s'agit toutefois d'un projet coûteux. Par conséquent et en vue de poursuivre la diffusion de ces ressources inépuisables, nous avons pris les dispositions nécessaires afin de prévenir les éventuels abus auxquels pourraient se livrer des sites marchands tiers, notamment en instaurant des contraintes techniques relatives aux requêtes automatisées.

Nous vous demandons également de:

+ *Ne pas utiliser les fichiers à des fins commerciales* Nous avons conçu le programme Google Recherche de Livres à l'usage des particuliers. Nous vous demandons donc d'utiliser uniquement ces fichiers à des fins personnelles. Ils ne sauraient en effet être employés dans un quelconque but commercial.

+ *Ne pas procéder à des requêtes automatisées* N'envoyez aucune requête automatisée quelle qu'elle soit au système Google. Si vous effectuez des recherches concernant les logiciels de traduction, la reconnaissance optique de caractères ou tout autre domaine nécessitant de disposer d'importantes quantités de texte, n'hésitez pas à nous contacter. Nous encourageons pour la réalisation de ce type de travaux l'utilisation des ouvrages et documents appartenant au domaine public et serions heureux de vous être utile.

+ *Ne pas supprimer l'attribution* Le filigrane Google contenu dans chaque fichier est indispensable pour informer les internautes de notre projet et leur permettre d'accéder à davantage de documents par l'intermédiaire du Programme Google Recherche de Livres. Ne le supprimez en aucun cas.

+ *Rester dans la légalité* Quelle que soit l'utilisation que vous comptez faire des fichiers, n'oubliez pas qu'il est de votre responsabilité de veiller à respecter la loi. Si un ouvrage appartient au domaine public américain, n'en déduisez pas pour autant qu'il en va de même dans les autres pays. La durée légale des droits d'auteur d'un livre varie d'un pays à l'autre. Nous ne sommes donc pas en mesure de répertorier les ouvrages dont l'utilisation est autorisée et ceux dont elle ne l'est pas. Ne croyez pas que le simple fait d'afficher un livre sur Google Recherche de Livres signifie que celui-ci peut être utilisé de quelque façon que ce soit dans le monde entier. La condamnation à laquelle vous vous exposeriez en cas de violation des droits d'auteur peut être sévère.

À propos du service Google Recherche de Livres

En favorisant la recherche et l'accès à un nombre croissant de livres disponibles dans de nombreuses langues, dont le français, Google souhaite contribuer à promouvoir la diversité culturelle grâce à Google Recherche de Livres. En effet, le Programme Google Recherche de Livres permet aux internautes de découvrir le patrimoine littéraire mondial, tout en aidant les auteurs et les éditeurs à élargir leur public. Vous pouvez effectuer des recherches en ligne dans le texte intégral de cet ouvrage à l'adresse `http://books.google.com`

HARVARD COLLEGE
LIBRARY

FROM THE
FARRAR FUND

The bequest of Mrs. Eliza Farrar in memory of her husband, John Farrar, Hollis Professor of Mathematics, Astronomy and Natural Philosophy, 1807–1836

GODFREY LOWELL CABOT SCIENCE LIBRARY

TRAITÉ

ÉLÉMENTAIRE

DE PHYSIQUE.

BRUXELLES. — IMPRIMERIE DE E. LAURENT.

TRAITÉ

ÉLÉMENTAIRE

DE PHYSIQUE,

César (Marcuetz)

PAR C. DESPRETZ,

PROFESSEUR DE PHYSIQUE AU COLLÉGE ROYAL DE HENRI IV, ANCIEN RÉPÉTITEUR DE CHIMIE ET SUPPLÉANT DE PHYSIQUE A L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE, MEMBRE DE PLUSIEURS SOCIÉTÉS SAVANTES.

OUVRAGE

ADOPTÉ PAR LE CONSEIL ROYAL DE L'INSTRUCTION PUBLIQUE

POUR L'ENSEIGNEMENT DANS LES ÉTABLISSEMENS DE L'UNIVERSITÉ DE FRANCE.

NOUVELLE ÉDITION,

AVEC PLANCHES.

BRUXELLES.

SOCIÉTÉ BELGE DE LIBRAIRIE, ETC.

HAUMAN, CATTOIR ET Cᵉ.

1837.

Phys 228.9.4 1853 Dec. 19.

Liv. 1. 2.

Posthumous Gift

of

Dr. John Farrar, LL.D.

of

Cambridge.

by his widow Mrs. Eliza Farrar.

A MESSIEURS

GAY-LUSSAC ET ARAGO,

MEMBRES DE L'ACADÉMIE DES SCIENCES, ETC.

HOMMAGE DE L'AUTEUR.

Cet ouvrage est la reproduction fidèle du cours que je professe au collége royal de Henri IV. En le revoyant constamment avec un sincère désir de le rendre de plus en plus utile aux élèves, j'ai dû y introduire de nouvelles améliorations chaque année. Cette quatrième édition en offrira, j'espère, un grand nombre.

La table indique, à la fin de l'ouvrage, la distribution des matières; mais, attendu qu'on ne commence pas ordinairement par la table la lecture d'un ouvrage, et qu'il importe, avant d'entreprendre l'étude d'une science, d'y jeter un coup d'œil général et de savoir de quoi elle se compose, je crois devoir faire connaître d'abord les sept grandes divisions que j'ai adoptées.

I. Notions générales sur la matière, le mouvement et les machines simples.

II. Histoire de la chaleur. — Théorie des gaz et des vapeurs. — Hygrométrie.

III. Atmosphère. — Baromètre. — Densités. — Pompes à air et à eau. — Machines à vapeur.

IV. Électricité. — Galvanisme. — Magnétisme. — Phénomènes électro-dynamiques.

V. Optique.

VI. Acoustique.

VII. Météorologie. — Températures du globe. — Sources de chaleur.

Dans la plupart des autres sciences, les faits et les principes se déduisent les uns des autres, et leur développement rationnel trace nécessairement au professeur la marche qu'il doit suivre dans leur exposition ; il n'en est pas tout-à-fait de même en physique. Variée comme la nature qu'elle décrit, cette science se compose de plusieurs parties qui n'ont pas entre elles une telle connexité, qu'il soit absolument nécessaire de les classer toujours dans le même ordre. Ainsi, quand on s'est occupé des propriétés générales de la matière, quand on a donné la théorie des gaz et des vapeurs, il est à peu près indifférent de commencer par l'optique, l'électricité ou l'acoustique*. Mais, quel que soit l'ordre qu'on adopte, les principes et les faits doivent, dans chaque partie, être présentés graduellement avec clarté et précision; c'est là ce que j'ai tâché de faire.

La physique, au point où elle est parvenue aujourd'hui, n'a plus rien de commun que le nom avec cette physique dite scolastique, que les préceptes de Bacon et les exemples de Galilée ont si heureusement contribué à bannir de l'enseignement public.

Déjà, du temps de Newton, les esprits supérieurs prenaient l'expérience pour base de leurs travaux, et l'on peut en citer pour preuve la décomposition de la lumière. Mais combien d'hommes de mérite subissaient encore le joug de l'ancienne routine! Combien d'hommes distingués n'avaient d'autre guide que l'autorité des anciens maîtres! C'est surtout depuis un demi-siècle que la physique a pris un grand essor; c'est depuis cette époque que cette belle branche des connaissances humaines s'est enrichie de tant de brillantes découvertes, auxquelles, on peut le dire, les savans français ont pris la plus glorieuse part.

L'importance de l'étude de la physique n'a plus besoin d'être démontrée. Il est aujourd'hui reconnu qu'elle doit être le complément de toute bonne éducation. Cette étude, si elle est bien faite, donne comme toutes les autres de la force et de la justesse à l'esprit des jeunes gens; mais elle a de plus le double et le précieux avantage de leur inspirer la plus haute idée de la puissance et de la sagesse du Créateur, et de leur fournir des méthodes expérimentales applicables dans une infinité de circonstances, et des indications utiles même dans les usages ordinaires de la vie.

Je ne partage point l'opinion des personnes qui pensent que les livres élémentaires sont peu favorables aux progrès des siences : il me semble au contraire que le moyen le plus certain de faire avancer une science, c'est

* Cependant si ce changement n'eût pas nécessité un travail considérable pour les planches, j'aurais placé dans cette nouvelle édition l'acoustique avant l'optique.

d'augmenter le nombre des personnes qui la cultivent, en en rendant la première étude plus facile. Il y a d'ailleurs bien peu de sciences dont on ne puisse faire, en un volume ordinaire, les principes généraux et essentiels et les faits d'où ils ont été déduits.

J'ai placé à la fin de mon ouvrage quelques chapitres sur des matières dont on s'est peu occupé dans les traités de physique : je veux parler de la météorologie, des températures du globe, et des sources de la chaleur animale ; il m'a semblé que ces diverses parties étaient assez avancées pour entrer dans l'enseignement de la physique générale. Cette innovation, déjà introduite dans la première édition, a reçu l'approbation des savans.

Il eût été bien difficile d'exposer les phénomènes de la pesanteur, la théorie et la construction des instrumens d'optique, sans faire usage des formules d'algèbre ; je ne les ai employées que dans quelques circonstances très rares ; mais, afin de ne pas arrêter les lecteurs peu familiers avec l'analyse, j'ai rejeté les calculs dans les notes.

Plusieurs savans, qui rendent aux sciences le double service de les enrichir de leurs découvertes et d'aider de leurs lumières ceux qui les cultivent, ont bien voulu me donner des conseils. Je les prie de recevoir ici l'expression de ma vive reconnaissance.

J'ai retouché attentivement mon ouvrage. J'ai développé plusieurs parties que je m'étais borné à mentionner dans les précédentes éditions. Enfin j'ai tâché de le rendre plus digne de l'accueil favorable que le public a bien voulu lui faire.

Paris, septembre 1836.

TRAITÉ ÉLÉMENTAIRE

DE

PHYSIQUE.

NOTIONS PRÉLIMINAIRES SUR LA MATIÈRE, LES LOIS DU MOUVEMENT ET LA CHUTE DES CORPS, ETC.

PROPRIÉTÉS GÉNÉRALES DES CORPS.

1. On s'occupe spécialement en physique des modifications passagères que subissent les corps, soit par leur influence réciproque, soit par l'action de la lumière, de la chaleur, de l'électricité, etc. Nous verrons que ces modifications consistent en général dans des mouvemens plus ou moins manifestes.

On appelle *corps* tout ce qui est susceptible de produire sur nos organes un certain nombre de sensations déterminées. L'expérience prouve que tous les corps peuvent être divisés en parties tellement petites, qu'elles échappent à nos sens. C'est à ces parties qu'on donne le nom de *molécules*.

On entend par phénomène un changement quelconque opéré dans un ou plusieurs corps.

On donne le nom de loi à un énoncé plus ou moins simple qui embrasse un grand nombre de phénomènes du même genre.

La faculté qu'a chaque corps d'exciter en nous des sensations diverses, constitue les propriétés particulières par lesquelles nous en reconnaissons la présence. Parmi ces propriétés, il en est quelques unes qui appartiennent à tous les corps, et c'est pour cela qu'on les a nommées générales. Telles sont l'étendue, l'impénétrabilité, la mobilité, la divisibilité, la porosité, l'inertie, la pesanteur et l'attraction. Toutes ces propriétés, quoique générales, ne sont pas essentielles à la matière. Nous admettons, avec plusieurs physiciens, que l'étendue et l'impénétrabilité sont les deux seules propriétés sans lesquelles on ne conçoit pas l'existence des corps.

2. *De l'étendue.* — Tout corps occupe une portion de l'espace universel, c'est-à-dire que tout corps est étendu. Nous n'avons pas l'idée d'un corps sans y joindre celle de l'étendue.

Le volume d'un corps n'est autre chose que son étendue. L'étendue du plus petit corps a toujours trois dimensions : longueur, largeur et profondeur.

3. *De l'Impénétrabilité.* — Deux corps quelconques ne peuvent occuper en même temps le même lieu de l'espace. C'est à cette propriété inhérente à la matière qu'on a donné le nom d'impénétrabilité.

La réunion de ces deux propriétés, l'étendue et l'impénétrabilité, suffit pour caractériser la matière.

Il est bon de prémunir le lecteur contre quelques exemples de pénétration apparente : une pointe d'acier qu'on enfonce dans le bois en écarte les parties, mais ne le pénètre pas ; il en est de même de tout corps solide qui se meut dans les divers fluides.

Les combinaisons chimiques semblent, en général, indiquer la pénétrabilité. Par exemple, l'alcool (esprit de vin) et l'eau occupent, après leur mélange, un volume moindre que la somme des volumes de chacun de ces deux liquides. Beaucoup d'alliages présentent encore le même fait. Enfin, on peut aussi citer la combustion du charbon, qui a lieu dans l'air, sans en changer le volume. Dans ces diverses circonstances, la pénétration n'est qu'apparente, et on le concevra avec facilité, si l'on remarque, comme l'observation va nous le

faire bientôt connaître, que la porosité appartient à tous les corps, c'est-à-dire que les molécules des corps laissent entre elles des interstices plus ou moins grands.

Dans les combinaisons chimiques, ces interstices se trouvent occupés en partie par les molécules des corps; de sorte que le volume d'un composé résultant d'une combinaison peut être beaucoup plus petit que la somme des volumes des composans, sans que pour cela les substances qui ont obéi à leur affinité mutuelle pour former le composé, cessent d'être impénétrables.

Les autres propriétés générales des corps sont la porosité, la divisibilité, la mobilité, l'inertie, la pesanteur et l'attraction.

Nous nous arrêterons d'abord sur ces propriétés. Il y en a d'autres, telles que la compressibilité, la dilatabilité; et il y en a qui n'appartiennent qu'à certaines classes de corps, telles que la dureté, la malléabilité, la ductilité, l'élasticité, etc. Nous y reviendrons plus loin.

4. *De la Porosité.* — Les molécules des corps ne sont pas en contact parfait; elles sont séparées par des espaces vides, appelés *pores*, et variables en grandeur pour les différens corps. Tout le monde sait que beaucoup de corps, la pierre à bâtir, le grès, le bois, quoique secs à leur surface extérieure, perdent ensuite plus ou moins de leur poids par une dessiccation prolongée, et cela à cause de l'évaporation de l'eau contenue dans leur intérieur.

Le sucre, jeté dans l'eau, se couvre de bulles aériennes qui paraissent bientôt à la surface du liquide. L'air est déplacé par le liquide qui s'introduit dans les pores du sucre.

Dans certains corps, comme les métaux, le verre, le marbre, etc., la porosité ne peut pas être rendue aussi sensible que dans le grès ou le sucre, mais elle n'existe pas moins, car tous ces corps augmentent de volume par la chaleur, et se contractent par le froid, ce qui montre que les molécules ne se touchent pas, puisqu'elles peuvent être plus ou moins rapprochées. On parvient d'ailleurs, par l'application d'une forte pression sur un corps plongé dans un liquide, à faire pénétrer ce liquide dans le corps, sans production d'aucune crevasse apparente.

On constate la porosité par plusieurs expériences fort simples. Par exemple, si l'on plonge un œuf dans un verre plein d'eau, et qu'on place le tout sous la machine pneumatique, on voit l'air de l'intérieur de l'œuf sortir à travers la coquille, à mesure qu'on fait le vide dans la cloche.

On démontre la porosité du bois, du cuir, etc., en mettant du mercure dans une virole fermée à sa base par une plaque de bois ou de cuir, et en adaptant cette virole à une cloche dans laquelle on fait le vide. Aussitôt que l'air de l'intérieur de la cloche est raréfié à un certain degré, la pression de l'atmosphère fait tomber le mercure sous la forme d'une pluie argentée.

On appelle *masse* d'un corps la somme totale des parties matérielles qu'il renferme; et cette somme totale, prise sous un volume donné, est ce qu'on appelle *densité*; en sorte que la densité est le rapport de la masse au volume.

5. *De la Divisibilité.* — L'observation apprend que tous les corps assez grands pour être palpables sont susceptibles d'être divisés en plusieurs parties; que ces nouvelles parties peuvent être partagées en d'autres plus petites, et ainsi de suite, jusqu'à ce que la division donne des particules tellement ténues, qu'elles échappent aux sens par leur petitesse.

Nous allons citer quelques exemples par lesquels on peut juger de l'immense divisibilité de la matière. Un centigramme d'indigo donne une teinte bleue assez intense à 100,000 grammes d'eau; mais chaque gramme peut être facilement divisé en 1000 parties; de sorte qu'un centigramme d'indigo est divisible en 100 millions de parties. L'odorat, encore plus que la vue, nous prouve la grande divisibilité de la matière. Une goutte d'essence de térébenthine répand son odeur dans un vaste appartement; l'odeur d'une faible quantité de musc se fait sentir dans une chambre spacieuse, pendant plusieurs années, sans que le poids de cette substance soit sensiblement diminué. Cependant le renouvellement de l'air emporte les particules odorantes, qui se dégagent sans cesse, puisque la chambre en est continuellement remplie.

On trouve aussi dans les métaux des exemples d'une très grande divisibilité. Le batteur d'or réduit ce métal en feuilles tellement légères, que le moindre souffle les met en mouvement. L'or et le platine sont réduits, à l'aide de la filière, en fils d'une ténuité extrême. Avec un gramme de l'un de ces métaux on ferait un fil de plusieurs lieues de longueur (1).

6. *De l'Inertie.* — Tous les corps persévèrent dans l'état de mouvement ou de repos dans lequel ils se trouvent. On a donné le nom d'inertie à ce défaut d'aptitude qu'ont tous les corps d'apporter d'eux-mêmes le plus petit changement à leur état actuel.

L'inertie à l'état de repos (2) est offerte par une observation constante: jamais on n'a vu un corps

(1) Wollaston a imaginé un procédé ingénieux pour donner aux fils de platine un degré de finesse que jamais le procédé de la filière ne pourrait atteindre. Ce procédé consiste à fixer dans l'axe d'un cylindre creux un fil de platine déjà fin, et à l'envelopper d'argent, ce qui se fait en y versant ce dernier métal en fusion. Le fil de platine ainsi enveloppé d'argent est passé de nouveau à la filière, l'argent qui le recouvre est dissous ensuite par l'acide nitrique, et le fil de platine reste intact. M. Becquerel, en remplaçant l'acide nitrique par le mercure, a obtenu des fils d'acier d'une très grande ténuité. Nous verrons l'utilité de pareils fils, en traitant de l'optique.

(2) Ce n'est que par une abstraction que nous consi-

au repos se mettre de lui-même en mouvement. Un exemple remarquable de l'inertie dans l'état de mouvement se présente dans le cours des planètes. La vitesse de la lune autour de la terre, celle de la terre autour du soleil, ne paraissent pas avoir diminué depuis l'origine des observations astronomiques.

Si à la surface de la terre nous ne voyons pas les corps abandonnés à eux-mêmes conserver longtemps les vitesses qu'ils ont acquises, c'est que le mouvement en est bientôt détruit par la résistance de l'air et des autres corps. Les planètes, au contraire, se mouvant dans le vide, restent animées des mêmes vitesses qui leur ont été imprimées.

7. *De l'Attraction.* — Dans beaucoup de circonstances on voit les corps se porter les uns vers les autres sans qu'il existe aucune cause sensible de ce mouvement : on a désigné cette tendance mutuelle par le mot d'attraction. Il faut se rappeler qu'on entend par là exprimer le fait et non la cause.

L'attraction s'exerce entre les corps à distances insensibles ; c'est par cette espèce d'attraction, qui prend alors le nom d'*attraction moléculaire*, d'*affinité*, de *cohésion*, qu'on explique les phénomènes chimiques et plusieurs phénomènes que la physique considère. Mais on donne plus particulièrement le nom de *cohésion* à l'action réciproque des parties d'un même corps, et celui d'*affinité* à l'action des parties différentes.

L'attraction s'exerce aussi à des distances considérables ; elle porte alors plus spécialement le nom de *gravitation* ou d'attraction planétaire. Ainsi le soleil attire tous les corps renfermés dans l'univers, et réciproquement il est attiré par eux. L'intensité de cette action est *proportionnelle à la masse*, et *en raison inverse du carré de la distance*. Telle est la loi qui règle les actions réciproques de tous les corps célestes, découverte par Newton.

Une sphère attire un point matériel placé à sa surface ou hors de sa surface avec la même intensité que si toute la matière dont elle est composée était réunie à son centre : on démontre ce théorème par la géométrie. Nous l'admettrons comme un fait. On le conçoit d'ailleurs facilement ; car soit un point a (*fig.* 6) placé hors de l'enveloppe sphérique $dd'kk$; si toute la matière est ramenée à son centre, la diminution de l'intensité causée par l'éloignement, relativement au point a, des parties de la moitié $dd'k$, sera compensée par la diminution de la distance de celles que renferme l'autre moitié $dd'k$; et puisqu'une sphère solide peut être considérée comme l'assemblage d'une infinité d'enveloppes sphériques, il en résulte que cette proposition paraîtra fondée, même aux personnes qui n'ont que des notions très élémentaires de calcul.

dérons l'état de repos ; car il n'y a pas une particule en repos dans l'univers. La terre, les planètes, se meuvent autour du soleil ; le soleil lui-même a un mouvement sur son axe.

Deux corps placés à la surface du globe ne manifestent aucun mouvement sensible l'un vers l'autre, parce que l'attraction prépondérante de la terre les dérobe à l'effet de leur attraction mutuelle, mais on peut, comme l'a fait Cavendish en 1798, mettre en évidence l'attraction mutuelle de tous les corps. La partie principale de l'appareil employé par cet ingénieux physicien était un levier horizontal suspendu à un fil métallique vertical non tordu (*fig.* 13). Le levier portait à chacune de ses extrémités une petite boule métallique : un globe de plomb d'environ un pied de diamètre était placé près de chacune des boules, de manière à ce que les actions des deux globes, conspirassent pour faire tourner dans le même sens les deux bras du levier. Quand l'appareil fut disposé, l'action des globes de plomb sur les petites boules se manifesta par un mouvement sensible imprimé au levier.

Cavendish, connaissant le volume et la densité des boules et des globes de plomb, et le volume du globe terrestre, put, par la comparaison du mouvement du levier au mouvement qu'imprime la pesanteur à un pendule, parvenir à connaître la densité moyenne du globe terrestre, qu'il trouva égale à 5,5. Maskeline en 1772, et M. Carlini en 1824, ont trouvé 4,5 (voyez le pendule). Il faut donc que l'intérieur de la terre soit très dense, puisque la densité moyenne des substances qui sont à la surface n'est peut-être pas supérieure à 2.

(*Voyez* plus loin l'article *Élasticité*.)

8. *De la Pesanteur.* — Aucun corps à la surface du globe ne paraît dénué de pesanteur, c'est-à-dire de cette propriété de se précipiter vers le centre de la terre. Cette propriété n'est pas une condition essentielle à l'existence des corps ; cependant, comme la matérialité et la pesanteur paraissent toujours s'accompagner, l'existence de l'une suffit pour juger par induction de l'existence de l'autre.

9. *Du Mouvement.* — On appelle *mobilité* la faculté qu'à un corps d'être transporté d'un lieu dans un autre. Cette propriété appartient à tous les corps de la nature, puisqu'il n'y a pas de corps qui ne puisse être mis en mouvement par une cause quelconque, qu'on nomme force.

Mouvement uniforme. Le plus simple de tous les mouvemens est celui qui se fait en ligne droite, et dans lequel la vitesse (l'espace parcouru pendant l'unité de temps) est constante. Cette espèce de mouvement est produite par une impulsion instantanée. Dans le mouvement uniforme, l'espace parcouru est égal à la vitesse multipliée par le temps. La formule de ce mouvement est $E = VT$, E représentant l'espace, V la vitesse, T le temps ; chacune de ces quantités étant rapportée à une unité de son espèce.

Une impulsion instantanée ne peut produire qu'un mouvement rectiligne. Un mouvement curviligne peut aussi être uniforme, mais il est produit

par une force agissant d'une manière continue dans une direction sans cesse variable.

Deux mobiles qui reçoivent la même vitesse d'une même force ont *des masses égales*; si les mobiles sont de plus de même nature, ils renferment la même quantité de matière.

Le *rapport* de deux masses est celui des *forces* employées pour leur imprimer la même *vitesse*.

L'expérience et l'observation montrent que *les forces sont proportionnelles aux vitesses* qu'elles impriment à une même masse.

Il résulte de ces deux dernières proportions que deux forces F et F' imprimant la première une vitesse V à la masse M, et la deuxième une vitesse V' à la masse M', sont entre elles comme les produits $M\,V$ et $M'\,V'$.

Le produit $M\,V$, qu'on appelle en mécanique *quantité de mouvement*, peut servir de mesure à la force F. A une autre masse M' elle imprimerait une vitesse V' qui serait donnée par l'équation $M\,V = M'\,V'$, d'où $V' = \frac{M\,V}{M'}$.

L'équation $M\,V = M'\,V'$ peut se traduire en la proportion $M : M' :: V' : V$, c'est-à-dire qu'une même force imprime à deux masses différentes *des vitesses qui sont en raison inverse de ces masses*.

10. *Mouvement varié.* La vitesse peut être variable : c'est le cas du mouvement varié. Dans le *mouvement uniformément varié*, qui est le seul que nous considérions ici (1), la vitesse *croît ou décroît de quantités égales en temps égaux*. Les forces qui produisent cette espèce de mouvement sont appelées *accélératrices* ou *retardatrices*. Dans le cas du mouvement uniformément accéléré, si le corps est animé à l'origine d'une vitesse représentée par A, et si dans chaque unité de temps la vitesse reçoit de la force accélératrice une quantité constante g, elle deviendra successivement $A + g$; $A + 2\,g$..; $A + gt$. Si le mouvement était uniformément retardé, la vitesse serait $A - g$; $A - 2g$... $A - gt$.

11. Voyons comment croît l'espace, par rapport au temps, en supposant la vitesse nulle à l'origine ou $A = o$. Soit AF (*fig.* 1) la ligne représentant le temps, divisée en un certain nombre de parties égales entre elles et à l'unité de temps. Supposons pour plus de simplicité que les lignes Bp, Cm, Dl..., élevées perpendiculairement sur la ligne AF, représentent les vitesses acquises après chaque unité de temps, l'espace total parcouru sera la somme des espaces partiels : il sera toujours possible de prendre l'unité de temps assez petite pour que la vitesse soit sensiblement constante. L'espace parcouru dans ce cas sera le produit du temps par la vitesse ; si maintenant l'on donne au mobile, dès l'origine du mouvement, les vitesses Bp, Cm, Dl, etc., qu'il n'a acquises qu'à la fin de chaque unité, l'espace total parcouru sera la somme des rectangles $A\,B\,p\,n$, $B\,C\,m\,s$, $C\,D\,l\,z$, etc. Si au contraire on suppose qu'il se meuve dans chaque unité de temps avec la vitesse qu'il a dès l'origine, alors la somme des espaces parcourus sera, zéro, $B\,C\,q\,p$, $C\,D\,r\,m$, etc. La première supposition donne un résultat trop fort, la seconde un résultat trop faible; la différence sera d'autant plus petite que l'unité de temps sera moindre, laquelle dans un mouvement de cette espèce est réellement infiniment petite. On voit d'ailleurs que la limite est le triangle $A\,F\,H$; l'espace total parcouru pendant le temps AF, sera donc égal à $\frac{AF \times FH}{2}$; et comme FH est la vitesse finale, et que cette vitesse est égale à $T\,g$, l'expression de l'espace parcouru deviendra $\frac{T \times T\,g}{2} = \frac{g\,T^2}{2}$; ainsi dans le mouvement uniformément varié, *les espaces parcourus croissent comme les carrés des temps*.

D'où il résulte que les deux formules du mouvement uniformément varié, sont $V = g\,T$, et $E = \frac{g\,T^2}{2}$ (*a*).

V est la vitesse acquise au bout d'un certain temps T.

E est l'espace parcouru pendant le même temps. Si l'on fait $T = 1$ dans la formule (*a*), on obtient $g = 2\,E$, c'est-à-dire que dans le mouvement uniformément accéléré, *la vitesse acquise après l'unité de temps est double de l'espace parcouru, pendant cette unité*.

C'est pour plus de simplicité, que nous avons supposé la vitesse du mobile nulle à l'origine; ce cas mérite surtout de fixer notre attention, parce que la chute des corps va bientôt nous en offrir une application.

Si la vitesse n'est pas nulle à l'origine, rien n'est plus simple que de tenir compte d'une vitesse imprimée par une impulsion instantanée. Soit A cette vitesse : la vitesse totale du corps, soumis à la fois à cette impulsion et à l'action d'une force accélératrice constante, est $A + g\,T$ au bout du temps T. Pour avoir l'espace parcouru, il faut ajouter les deux espaces séparés ; or, en vertu de l'impulsion, l'espace parcouru d'un mouvement uniforme est $A\,T$; mais nous venons de voir que la force accélératrice seule fait parcourir un espace $\frac{g\,T^2}{2}$: ainsi l'espace total est représenté par $A\,T + \frac{g\,T^2}{2}$.

Application à la Pesanteur.

12. On croyait avant Galilée que la vitesse communiquée par la pesanteur à différens corps était

(1) Le pendule nous offrira plus loin l'exemple d'un mouvement non uniformément varié.

différente, suivant la nature ou le volume de ces corps. Cette opinion était fondée sur ce que la chute des corps très pesans est plus rapide que celle des corps légers. Galilée fit voir que la différence tient à la résistance de l'air. Pour cela, il laissa tomber du haut de la tour de Pise, quatre boules de même volume, d'or, de plomb, d'ivoire et de liége; et il remarqua que la boule d'or, qui était la plus pesante, arrivait la première à terre, et que la boule de liége, qui était la plus légère, arrivait la dernière; mais que le retard de la boule de liége était tel, qu'elle était à quelques pieds en arrière, lorsque la boule d'or touchait la terre. Ce grand philosophe en conclut avec raison, que ce retard ne devait pas être attribué à une différence d'action dans la pesanteur, mais bien à la résistance du milieu dans lequel se faisait le mouvement; la résistance de l'air est ici la même pour toutes les boules, parce qu'elles présentent la même surface à ce fluide. Mais cette force, toujours la même, produisant une plus grande diminution proportionnelle de vitesse sur les corps les plus légers, ceux-ci doivent tomber moins rapidement dans l'air.

On peut d'ailleurs vérifier directement que *l'action de la pesanteur* imprime *la même vitesse à tous les corps;* pour cela, il suffit de faire tomber dans un tube de verre de quelques pieds de longueur, qu'on a préalablement vidé d'air, de petites boules de plomb, de liége et de moelle de sureau, et on observe que dans leur chute ces corps sont toujours ensemble. Quand on a constaté ce résultat, on voit, si on laisse rentrer l'air peu à peu, ces corps différer de plus en plus dans leur vitesse.

Les liquides paraissent tomber différemment des solides, parce qu'ils sont divisés par l'air, lequel oppose une résistance inégale à leurs diverses parties. Mais, dans le vide, ils tombent sans se diviser, comme on le voit dans le *marteau d'eau*, tube vide d'air, et contenant une certaine quantité d'eau. On a chassé l'air en portant l'eau à l'ébullition, et en fermant pendant l'ébullition l'extrémité du tube à la lampe.

13. Le mouvement des corps pesans abandonnés à l'action de la terre doit être *uniformément accéléré*, car cette action est continue et sensiblement constante dans son énergie, puisque les espaces parcourus à la surface de la terre sont très petits en comparaison du rayon terrestre (1).

Deux choses s'opposent à ce qu'on le démontre par des expériences directes dans la verticale: la résistance de l'air et la rapidité de la chute; cette dernière est telle, qu'un corps parcourt à Paris, dans la première seconde, un espace égal à $4^m, 9$; mais il est possible de lever ces difficultés en ralentissant le mouvement. On affaiblit ainsi considérablement l'obstacle apporté par la résistance de l'air, et on rend l'observation plus facile. Il est visible que la nature du mouvement accéléré est tout-à-fait indépendante de la valeur absolue de la force accélératrice; elle ne dépend uniquement que de la continuité de son action et de la constance de son énergie.

Nous ferons tomber, comme l'a fait Galilée, les corps sur un plan incliné (*fig.* 2), sur lequel la pesanteur est réduite à $g' = g\frac{AB}{AC}$ (comme on le démontre dans les ouvrages de mécanique), g étant l'intensité dans la verticale, c'est-à-dire la vitesse acquise pendant la première unité de temps; de sorte qu'on est le maître de ralentir la vitesse autant qu'on le désire par un plan plus ou moins incliné. En divisant la ligne AC en parties égales, et laissant tomber le corps du point A, d'abord pendant 1 seconde, ensuite pendant 2, 3... secondes, on reconnaît que les nombres de divisions parcourues sont comme... 1, 4, 9...; c'est-à-dire que les espaces 1, 4, 9, 16..., *parcourus, sont proportionnels aux carrés des temps*, 1, 2, 3, 4, etc. (1re proposition vérifiée.)

Tableau comparatif des résultats dans la verticale et sur un plan incliné, dont la hauteur A B *est le sixième de la longueur* A C.

TEMPS.	ESPACES PARCOURUS.	
	Dans la verticale.	Sur le plan incliné.
1''	$4^m, 9$	$0^m, 81$
2''	19, 6	3, 24
3''	44, 1	7, 29

Dans le mouvement uniformément accéléré, la vitesse croît proportionnellement au temps; voyons s'il en est de même dans la chute des corps. Si au bout d'un temps quelconque, la force accélératrice cesse d'agir, le corps continuera à se mouvoir, avec une vitesse qui lui fera parcourir dans le même temps un espace double de celui qui a été déjà parcouru, ce qui se déduit facilement de la formule $E = \frac{gT^2}{2}$ du nº 11. Le tableau précédent offre le même rapport: en effet, l'espace parcouru dans deux secondes est composé: 1º de l'espace $0^m, 81$

(1) Nous avons déjà dit qu'une sphère exerce sur un point placé à sa surface la même action que si toute sa masse était réunie à son centre. Si g représente l'action de la terre à la distance cr (*fig.* 3), c'est-à-dire à sa surface, cette force deviendra $g\frac{cr^2}{(cr+rm)^2}$ à la distance cm. Or, comme rm est très petit relativement au rayon de la terre, $\frac{cr}{cr+rm}$ est sensiblement égal à l'unité. La force attractive est donc à peu près la même, pour toutes les observations que nous faisons, dans un même lieu à la surface de la terre.

parcouru dans la première seconde ; 2° d'un espace égal dans la deuxième seconde, en vertu de la même action : il faut donc que l'espace parcouru en vertu de l'effet inconnu de la vitesse acquise soit égal à 2 fois 0, 81, puisque l'espace total dans deux secondes est quadruple de 0, 81. Si l'on calcule de la même manière les vitesses acquises après 2, 3, 4, etc., secondes, on voit qu'elles suivent la progression 2, 3, 4, etc. ; c'est-à-dire que *dans la chute des corps, les vitesses croissent proportionnellement aux temps.* (Deuxième proposition vérifiée.)

14. Un mécanicien anglais nommé Athood a imaginé une machine (*fig.* 7) qui est aujourd'hui employée pour la démonstration expérimentale de la loi de la chute des corps. La partie principale de cette machine ingénieuse est un fil de soie (*fig.* 16), aux extrémités duquel sont fixées des masses égales m et m' de 3 à 400 grammes. Le fil roule sur une roue dont le mouvement est rendu très facile par une disposition particulière, qui consiste à en faire reposer l'axe sur d'autres roues également mobiles ; une horloge H est fixée à la machine. Si l'on met les deux masses en mouvement, en les poussant, par exemple, avec la main ; après qu'on aura cessé d'agir sur elles, elles resteront, en vertu de leur inertie, dans l'état de mouvement dans lequel on les aura mises, et le mouvement sera nécessairement uniforme. Si l'on augmente l'une des deux masses prises à l'état de repos, d'un poids additionnel, l'action de la pesanteur, s'exerçant sur cette masse additionnelle, la déterminera à descendre, et même lui imprimera un mouvement accéléré ; mais comme celle-ci doit entraîner dans sa chute les deux masses auxquelles elle est liée, sa vitesse sera ralentie dans le rapport de sa masse propre à la somme actuelle des masses : de sorte que si chacune des deux masses primitives est égale à m, et que celle du poids additionnel soit égale à p, la vitesse sera réduite dans le rapport de p à $2m + p$, c'est-à-dire qu'elle sera $g\frac{p}{2m+p}$ (voyez le n° 6).

On peut répéter avec cet appareil les expériences que nous avons indiquées pour le plan incliné. On constate que *les espaces parcourus sont proportionnels aux carrés des temps ;* ou vérifiera également la progression d'intensité des vitesses acquises à diverses époques du mouvement. Pour cette seconde expérience, on donne à la masse additionnelle la forme d'une lame oblongue ; la longueur de cette lame dépasse le diamètre d'un anneau a placé le long de la règle verticale sur laquelle se comptent les espaces, de sorte que la masse additionnelle est retenue par cet anneau, et le mouvement devient uniforme en vertu de la vitesse acquise : on trouve que cette vitesse est telle, que le corps parcourt, *dans un temps égal à celui pendant lequel le mouvement a été accéléré*, un espace *précisément double* ; et en plaçant l'anneau de manière que le mouvement uniforme soit produit successivement après 2, 3, 4,..... secondes, on trouve que les vitesses croissent proportionnellement aux temps.

Tableau des espaces parcourus.

Durée de la chute.	Chute libre dans la verticale.	Somme des masses 105 gr. : masse additionnelle 1/2 gr. Espaces parcourus.	Somme des masses 105 gr. : masse additionnelle 1/4 gr. Espaces parcourus.
1″	4m,9	0m,0116	0m,0058
2″	19, 6	0, 0464	0, 0232
3″	44, 1	0, 1044	0, 0522

La première colonne renferme la durée de la chute, les trois autres représentent les espaces parcourus : les nombres de chacune de ces colonnes ont entre eux le même rapport que les carrés des nombres de la première.

Tableau des vitesses acquises

Correspondantes au tableau précédent.

Après.			
1″	9m,8	0m,0232	0m,0116
2″	19, 6	0, 0464	0, 0232
3″	29, 4	0, 0696	0, 0348

Ces résultats montrent aussi que deux forces inégales appliquées à une même masse lui *impriment des vitesses proportionnelles* à ces forces. Des expériences analogues montreraient qu'une même force appliquée à *deux masses inégales* leur communique des *vitesses en raison inverse de ces masses.*

15. En éliminant le temps T entre les formules $V = g\,T$ et $E = \frac{g\,T^2}{2}$, on obtient pour la vitesse une expression tout-à-fait indépendante du temps et égale à $V = \sqrt{2\,E\,g}$, qui, traduite en langage ordinaire, indique que, pour avoir la vitesse après un certain temps, il faut *multiplier le double de l'espace parcouru par la valeur de g, et extraire la racine carrée du produit.*

On peut tirer de là une remarque importante : si plusieurs corps partent d'une même hauteur $A\,B$ (*fig.* 14), et suivent des chemins différens $A\,D$, $A\,C$, AB, ils auront à la fin de la chute, aux points D, C et B, la même vitesse ; ce qui se voit en substituant successivement à g, valeur de la pesanteur dans la verticale, la valeur sur les plans inclinés $A\,K$ et $A\,C$. On trouve la même valeur pour la vitesse acquise aux points D, C et B. *Voyez* le n° 13 pour l'expression de la pesanteur sur le plan incliné.

16. Il ne sera pas inutile de dire un mot du mouvement retardé ; on en a un exemple dans le mouvement d'un corps lancé de bas en haut. La pesan-

teur, étant dirigée en sens contraire de la vitesse d'impulsion, diminue peu à peu cette vitesse, qui finit par être nulle, et le corps en repos, sollicité par la pesanteur seule, retombe vers la terre. A quelle hauteur parviendra un corps lancé de bas en haut, avec une vitesse b? Comme l'action de la pesanteur est en sens contraire de la direction de la vitesse imprimée, on aura les deux équations $v = b - g\,t$; $e = b\,t - \frac{g\,t^2}{2}$. Le corps montera jusqu'à ce que la vitesse soit détruite; ainsi l'on aura $b - g\,t = o$, ou $t = \frac{b}{g}$, d'où $e = \frac{b^2}{2g}$.

Ainsi le corps se mouvra pendant un temps $\frac{b}{g}$ et s'élèvera à la hauteur $\frac{b^2}{2g}$. Quelle vitesse le corps acquerrait-il en tombant de cette hauteur? $\sqrt{2.\frac{b^2}{2g}}$ $\times g$ ou b. Ainsi pour lancer un corps à une hauteur donnée, il faut lui imprimer la vitesse qu'il acquerrait en tombant de cette hauteur : par exemple un corps parviendrait à 2500 mètres, s'il avait de bas en haut une vitesse de $\sqrt{2.\ 2500.\ 9,8}$, ou 221m, 36 par seconde.

Du Mouvement curviligne

17. Pour bien concevoir le mouvement curviligne, il est nécessaire de connaître la règle du parallélogramme des forces, d'après laquelle la résultante de deux forces quelconques appliquées en un même point, et représentées par des droites prises sur leurs directions à partir de ce point, est représentée en grandeur et en direction par la diagonale du parallélogramme construit sur les deux lignes proportionnelles à ces forces.

Si donc les lignes $A\,B$ et $A\,C$ (*fig.* 8) représentent deux forces p et q appliquées au point A, on construira sur ces lignes le parallélogramme $ABCD$, et la diagonale AD sera la résultante des deux forces p et q.

Cette règle est vraie, quel que soit le rapport des forces; qu'elles soient commensurables ou incommensurables, c'est la même construction. (*Voy.* les ouvrages de Statique.)

Supposons qu'en D une force, dont l'intensité est représentée par $D\,F$, agisse dans la direction $D\,K$, le mobile sera maintenant soumis à l'action de la résultante $A\ D$ et de la nouvelle force $D\,F$; pour trouver la direction et la valeur de la résultante, il faudra construire sur $D\,F$ et $D\,E = A\,D$, le parallélogramme $FDE\,H$, dont la diagonale $D\,H$ sera la résultante des trois forces $A\,B$, $A\,C$, $D\,F$, on continuerait la même construction pour composer un nombre quelconque de forces. Si les instans auxquels ces différentes forces exercent leur action sont de plus en plus rapprochés, le polygone se changera en une courbe qu'on nomme *trajectoire*.

Ces notions, quoique très succinctes, suffiront pour rendre plus facile la conception de ce que nous dirons sur la projection des mobiles, sur la force centrifuge et sur le pendule.

18. Le mouvement d'un corps lancé dans une direction oblique à l'horizon, présente un exemple très simple du mouvement curviligne (*fig.* 11). Le corps pesant m, lancé dans la direction $m\,q$ par une impulsion instantanée, la suivrait avec une vitesse constante sans l'action de la pesanteur : de sorte qu'après le premier instant, il serait éloigné à une distance $m\,1$; après le second instant, à une distance $m\,2$ double; et ainsi de suite. Le même mobile, soumis seulement à la pesanteur, suivrait la loi de l'accélération des corps pesans; après le premier instant, il serait (sur la ligne $m\,p$) à une distance $m\,1$; après le second instant, à une distance $m\,4$ quadruple; après le troisième, à une distance $m\,9$ neuf fois plus grande, etc. : donc, en vertu des deux forces, il se trouvera après la 1re, la 2e,.... unités de temps, en m' m'', m''', etc.; et la suite de ces points formera une courbe qui, ayant les ordonnées proportionnelles aux carrés des abcisses, sera une parabole.

Les bombes lancées par l'explosion de la poudre décrivent des courbes paraboliques : le point le plus élevé H (*fig.* 15) est la hauteur du jet; l'espace $M\,K$ en est l'amplitude (La forme parabolique n'est pas toutefois exacte, parce que la résistance de l'air altère le mouvement.) (1).

De la Force centrifuge.

19. Soit un point matériel m (*fig.* 10) attaché à un point fixe c, par un fil inextensible $c\,m$. Supposons de plus qu'on lui imprime une vitesse quelconque dans la direction $m\,F$, perpendiculaire à la longueur du fil. Si ce point m n'est soumis à aucune force accélératrice, il décrira un cercle dont le centre sera en c et dont le rayon sera $c\,m$. Le fil éprouvera, pendant le mouvement, une tension, dans le sens de sa longueur; c'est cette tension qui est la force *centrifuge*. On pourra faire abstraction du fil, et considérer le mobile comme libre, si on lui applique une force égale et opposée à la tension. C'est par la combinaison de cette force qu'on nomme

(1) Si H est la plus grande hauteur à laquelle puisse atteindre le mobile en vertu de la vitesse actuelle, en le supposant lancé dans la verticale, la hauteur H' à laquelle il parviendra est égale à $H \times Sin.\ a$, a étant l'angle que forme la direction du mobile avec l'horizon.

centrale ou *centripète* et de l'effet de l'impulsion primitive que le cercle est décrit.

Soit f, l'intensité de la force centrale, on peut la considérer comme constante en grandeur et en direction pendant un temps infiniment petit t; ainsi, pendant que le mobile parcourt l'arc $m' m$, la force centrale est parallèle au rayon $m\,o$; si elle agissait seule sur le mobile, elle lui ferait parcourir l'espace $m\,s$. Or, en vertu de ce qui a été dit n° 11, on a : $s = \frac{g\,t^2}{2}$, d'où $g = \frac{2\,s}{t^2}$: on aura donc, en remplaçant g et s par leurs valeurs actuelles, $f = \frac{2\,m\,s}{t^2}$; mais d'après une propriété connue du cercle, $m\,s = \frac{\overline{m'\,m}^2}{2\,m\,o}$; d'où $f = \frac{\overline{m'\,m}^2}{t^2\,m\,o}$; et puisque le mouvement circulaire est uniforme, $\frac{m\,m'}{t}$, ou l'espace divisé par le temps, représente la vitesse; et comme dans cette circonstance on peut prendre l'arc pour la corde, à cause de la petitesse du premier, la valeur de f devient donc $f = \frac{v^2}{r}$; c'est-à-dire que *la force centrifuge dans le cercle est égale au carré de la vitesse divisé par le rayon.*

Ceci explique pourquoi, par un mouvement rapide donné à un fil terminé par une masse pesante, on finit par le rompre si l'on augmente successivement la vitesse d'impulsion : on remarque en même temps que le corps en liberté s'échappe par la tangente $M\,F$; la fronde en est un exemple.

De ce qui précède on peut déduire que, dans une courbe quelconque, la force centrifuge a pour mesure le carré de la vitesse divisé par le rayon du cercle osculateur, parce qu'on peut toujours supposer la coïncidence de la trajectoire, en chaque point d'une étendue infiniment petite, avec son cercle osculateur en ce point.

Voici une autre expression de la force centrifuge qui ne renferme plus la vitesse. On l'obtient par l'élimination de la vitesse v entre la valeur précédente $f = \frac{v^2}{r}$ et l'équation $2\,\pi\,r = v\,T$, T étant le temps nécessaire pour que le mobile parcoure avec une vitesse uniforme la circonférence entière; on trouve ainsi $f = \frac{4\,\pi^2\,r}{T^2}$. Cette dernière expression nous fait voir que la force centrifuge est en *raison directe du rayon et en raison inverse du carré du temps employé pour une révolution entière.* Elle nous sera utile pour l'évaluation numérique de la force centrifuge en un point quelconque de la surface de la terre.

20. On réalise, dans les cabinets de physique, plusieurs effets de la force centrifuge. Par exemple : on enfile par une baguette de fer $A\,B$ (*fig.* 20) quelques boules d'ivoire, puis, en faisant tourner avec force l'appareil sur un pivot $C\,D$, on remarque 1° qu'une boule placée au milieu y reste en repos malgré la rapidité de la rotation; en effet, si cette boule est exactement au centre, les différentes parties étant sollicitées en sens contraire, leurs actions doivent se détruire; 2° qu'une boule placée hors du centre glisse le long du fil et va frapper l'extrémité de la baguette.

3° Si l'on place deux boules de même nature réunies par un fil inextensible de part et d'autre de l'axe $C\,D$ de rotation, à des distances de cet axe, en raison inverse de leurs volumes ou de leurs masses, on trouve qu'elles restent dans les points où on les a placées. Le fil est ici négligeable. La force centrifuge de chaque boule peut être considérée comme proportionnelle au produit de la masse par sa distance au centre. Si ce produit est le même pour ces deux boules, le système des deux boules sollicitées par des forces égales et contraires doit rester en équilibre.

Si l'on fait l'expérience avec attention, on verra que la vitesse du mobile est d'autant plus grande qu'elle est plus éloignée du centre; ce qui est d'accord avec la dernière formule.

On peut faire une expérience semblable avec les liquides (*fig.* 17). ABC représente un tube de verre coudé, rempli en partie de liquide; on voit que ce liquide est poussé vers les extrémités A et C par l'effet de la force centrifuge; de plus, si l'on y met des corps différens en densité, par exemple de l'eau, de l'huile d'olive, des balles de plomb et de liége, les corps les plus pesans seront aux points les plus hauts du tube.

21. La terre a un mouvement de rotation sur son axe, les corps placés à sa surface participent à ce mouvement. D'après la dernière expression (n° 19), la force centrifuge est proportionnelle au rayon du cercle, le temps de la révolution étant le même; il en résulte qu'à l'équateur, où le rayon terrestre est le plus grand, la force centrifuge est la plus considérable, et les corps doivent avoir une pesanteur moindre, ce qui est confirmé par l'observation. Il est curieux de voir le rapport entre la force centrifuge et la pesanteur à l'équateur. Pour le déterminer, il suffira de mettre dans la formule citée 6,376,464 mètres valeur de rayon terrestre à l'équateur, et 86,164 secondes valeur d'une révolution entière du globe, et 3,14159 pour π, on trouve $f = 0^m,0339$; or la vitesse déduite des observations sur la pesanteur est $9^m,78$; il est visible que ce n'est là que la différence entre la gravité réelle et la force centrifuge; en ajoutant donc à ce nombre 9,78 la valeur de la force centrifuge $0^m,0339$, on aura $9^m,8139$ pour la gravité totale, qui, divisée par $0^m,0339$, donne 289 : ce qui montre qu'à l'équateur la force centrifuge est 1/289 de la gravité. Nous avons vu que la force centrifuge croît comme

le carré de la vitesse; ainsi, puisque 289 est le carré de 17; si le mouvement de rotation de la terre devenait 17 fois plus rapide, la force centrifuge serait 289 fois plus considérable, elle égalerait la gravité, et les corps à l'équateur seraient sans pesanteur. La force centrifuge combat la gravité dans tous les points de la surface de la terre; mais elle diminue de l'équateur aux pôles, d'une part parce que le rayon du cercle décrit devient moindre, et de l'autre parce que la force centrifuge devient de plus en plus oblique à la direction de la pesanteur, qui est toujours perpendiculaire à la surface de la terre (1).

On attribue en général à l'action de la force centrifuge la forme de la terre et des autres corps célestes, qui sont, comme elle, renflés vers leur équateur, et aplatis vers leurs pôles. Il est vrai que pour cela il faut admettre que ces différens corps ont été primitivement fluides ou dans un état de grande mollesse; la force centrifuge, s'exerçant avec plus d'énergie à l'équateur, a dû y déterminer l'accumulation d'une plus grande quantité de matière. On rend ce phénomène sensible au moyen d'un appareil fort simple (*fig.* 12). Cet appareil consiste en un ressort d'acier, circulaire, et percé par un diamètre *H K*. On donne un mouvement de rotation à l'axe; le cercle d'acier est entraîné dans le même sens, se renfle aux points *C* et *D*, s'aplatit aux pôles *H* et *K*, et d'autant plus, que la vitesse de rotation est plus considérable.

On peut encore réaliser le phénomène d'une autre manière: qu'on prenne une toupie très renflée vers son milieu, et qu'au moment de la mettre en mouvement, on la mouille sur toute la surface, on verra que l'eau aura disparu en totalité sur la partie renflée, tandis que près du clou et près de la partie supérieure il en restera une quantité notable: la projection de l'eau par la toupie peut même être aperçue.

Du Pendule.

22. La théorie physique du pendule dépend des connaissances que nous avons acquises précédemment sur la pesanteur et le mouvement curviligne.

Un pendule simple consiste en un point matériel suspendu par un fil sans pesanteur (*fig.* 19).

Ce cas idéal n'est pas réalisé dans la pratique; la verge du pendule, qui ordinairement est métallique, a un poids qu'on ne peut négliger, et la masse qui termine le pendule réel a un volume plus ou moins grand; mais la mécanique fait connaître les procédés du calcul par lesquels on ramène au pendule simple les résultats fournis par un pendule composé (1).

Quoi qu'il en soit, le mouvement du pendule simple ou composé est déterminé par l'action de la terre; si, par exemple, la masse pesante est portée en *D*, elle sera sollicitée par la pesanteur; mais cette force, agissant dans la verticale *D d*, perdra une portion de son intensité. Pour apprécier la perte, il faut décomposer la force *g* en deux autres forces rectangulaires qui agissent suivant *D h* et *D F*. La première est détruite par la résistance du fil *D C*; la seconde *m F*, perpendiculaire à *C D*, a pour valeur l'expression $g \cos d\,D\,F = g \sin h\,D\,d$. Cette composante tend à faire mouvoir la masse *m* dans le sens de la tangente *D F*; mais, comme cette masse est retenue par le *point de suspension C*, la courbe décrite est un arc de cercle; on voit de plus que l'action de la pesanteur ne contribue plus au mouvement de la masse *m* lorsque celle-ci est parvenue au point le plus bas; de sorte qu'elle ne continue à se mouvoir qu'en vertu de la vitesse acquise dans sa chute par l'arc *D A*; il résulte du n° 16, que cette vitesse est capable de lui faire parcourir un arc égal au premier. Elle montera donc jusqu'en *B*, où sa vitesse acquise est complètement détruite; alors, abandonnée à l'action de la pesanteur, elle retombera le long de *B A*; en *A*, la pesanteur sera détruite par la résistance du fil; le mouvement se continuera par la vitesse acquise, etc. Les oscillations auront ainsi lieu jusqu'à ce que la résistance de l'air, le frottement du point de suspension les aient détruites.

Le mouvement de la chute du pendule est accéléré; mais l'accélération n'est pas uniforme, puisque la composante $g \sin D\,C\,A$ diminue à chaque instant, jusqu'au point le plus bas, où elle est nulle.

La longueur de l'arc *B D* est ce qu'on appelle une oscillation.

Le calcul démontre que dans le cercle de très petites oscillations, par exemple de 3 à 4 degrés, sont sensiblement isochrones, mais l'isochronisme n'est rigoureux que pour un point matériel se mouvant sur un cycloïde.

23. Le pendule en usage dans les recherches de physique se rapproche beaucoup du pendule simple;

(1) g étant la pesanteur à la latitude de 45°, l représentant la latitude d'un lieu, l'intensité g' de la pesanteur dans ce lieu est égale à

$$g' = g\,(1 - 0{,}00284 \cos. 2\,l).$$

(1) Pour comprendre ce qu'on entend par centre d'oscillation, il faut remarquer que les points du pendule tendent à osciller d'autant plus vite qu'ils sont plus rapprochés du point de suspension; en sorte que les plus rapprochés accélèrent le mouvement des plus éloignés, et ceux-ci retardent le mouvement des premiers; d'où il suit qu'il doit y avoir un point dont la vitesse n'est augmentée ni diminuée. Ce point est ce qu'on appelle le *centre d'oscillation*. Dans tout pendule composé, il y a un ou plusieurs centres d'oscillation. La distance commune de ces points au point de suspension est la longueur du pendule.

La position du centre d'oscillation dépend de la forme du corps oscillant et même de la densité de ses parties, si celles-ci ne sont pas toutes homogènes.

il est formé d'une boule de platine très lourde, suspendue à un fil de cuivre, assez gros seulement pour la soutenir; on choisit ce métal à cause de son inaltérabilité à l'air et de sa grande densité. Cette boule est enchassée dans une calotte sphérique, fixée à l'extrémité du fil; on a soin de couvrir l'intérieur d'une matière grasse, afin de pouvoir chasser l'air qui se trouve entre la calotte et la sphère, et de rendre ainsi l'adhérence plus parfaite; la partie supérieure du fil est attachée à une verge métallique, laquelle est traversée par un couteau en acier trempé, reposant sur un plan d'agate, de sorte que le frottement est sensiblement nul. Tel était à peu près le pendule imaginé par Borda (*fig.* 18), qu'on appelle pendule absolu.

Dans les voyages on emploie avec avantage le *pendule invariable*. Ce pendule consiste en une forte tige en cuivre ou en bois, traversée dans la partie supérieure par un couteau semblable à celui dont il vient d'être question, et portant à sa partie inférieure une lentille pesante. Le support du pendule doit être établi sur des massifs de pierre. On compte le nombre des oscillations dans les divers lieux qu'on visite. Puis on fait osciller le pendule dans un lieu dont la pesanteur a été déterminée avec précision, par exemple à Paris. On déduit de là le rapport entre la pesanteur à Paris et la pesanteur dans un lieu quelconque, puisqu'il est le même que celui du carré des nombres d'oscillations faites dans chacun de ces lieux pendant le même temps.

Pour mesurer la longueur du pendule, on met le pendule en repos; puis on place au-dessous de la boule un petit plan d'acier qu'on élève doucement jusqu'à ce qu'il touche la boule sans la soulever. On enlève le pendule, et l'on y substitue une règle bien divisée en millimètres à l'extrémité de laquelle est une languette mobile également bien divisée : on a ainsi la longueur totale du pendule depuis le plan de suspension jusqu'au bas de la boule. On prend la longueur du fil, celle de la verge à laquelle est attaché le fil, enfin le diamètre de la boule.

On note, bien entendu, la température, la pression barométrique et l'état hygrométrique.

Enfin on fait la correction de la température sur les longueurs, et de l'influence de l'air sur les pesées; et l'on arrive par le calcul à $l = l' - A$; l étant la longueur du pendule simple synchrone avec le pendule composé, l' la distance entre l'axe de suspension et le centre d'oscillation de la boule. A renferme le poids du fil, celui de la calotte et celui de la boule.

La longueur du pendule à Paris, déterminée en 1792 par Borda, a été retrouvée sensiblement la même par MM. Bouvard, Biot et Mathieu en 1808, et par MM. de Humboldt et Arago en 1818.

Huyghens a découvert que les axes de suspension et d'oscillation sont réciproques, c'est-à-dire que si l'on fait osciller un pendule et qu'on le renverse de manière à prendre le centre d'oscillation pour centre de suspension, la durée des oscillations ne varie pas. Le capitaine Kater s'est fondé sur ce principe pour déterminer la longueur du pendule. Le pendule imaginé par ce savant est formé par une forte tige et par une lentille, portant deux couteaux tellement disposés que le tranchant de l'un passe par le centre d'oscillation de l'autre. Ce pendule fait le même nombre d'oscillations, quel que soit le tranchant sur lequel il repose. La longueur du pendule est ici la distance entre les deux tranchans, laquelle peut être mesurée avec une grande exactitude.

Un pendule fait des oscillations de plus en plus petites, et finit par s'arrêter tout-à-fait. Cette destruction de la vitesse du pendule est particulièrement causée par la résistance de l'air, qui allonge la durée de la demi-oscillation descendante, et abrége celle de la demi-oscillation ascendante (1) à peu près de la même quantité; d'où il suit que la durée d'une oscillation entière diffère peu de ce qu'elle serait dans le vide. Mais, comme les excursions du pendule deviennent successivement plus faibles, et comme le temps dépend de la grandeur de l'arc parcouru, il en résulte que l'isochronisme est altéré; heureusement cette altération est peu sensible, et le calcul peut en tenir compte.

Il y a deux manières de compter les oscillations: par un compteur dont le point de départ coïncide avec celui du pendule ou par une horloge qui n'est d'accord avec le pendule qu'à certains intervalles. On fait d'abord partir l'horloge avec le pendule, bientôt ils se séparent, puis ils sont de nouveau en coïncidence. Il suffit donc de compter le nombre des oscillations entre deux coïncidences et de noter le nombre des coïncidences pendant une observation.

M. Bessel a fait remarquer récemment qu'il faut tenir compte de l'affaiblissement de la pesanteur provenant de la masse d'air à mouvoir, en sorte qu'on doit augmenter la longueur du pendule trouvée sans égard à cette correction.

Application du Pendule à la pesanteur.

24. Nous avons déjà vu que les oscillations du pendule sont déterminées par l'action de la pesanteur. Elles doivent donc être plus ou moins rapides, selon que cette action est plus ou moins puissante. On conçoit même la possibilité de déduire cette intensité du nombre d'oscillations faites dans un

(1) Bouguer a d'abord annoncé que la durée d'une oscillation entière est la même dans le vide que dans un milieu résistant; M. Poisson a donné la démonstration de cette proposition. (*Voy.* le *Journ. de l'Ec. Polyt.*, cah. 15).

temps déterminé par un pendule d'une longueur connue. En effet, l'analyse donne la relation $T = \pi\sqrt{\frac{l}{g}}$, T étant le temps d'une oscillation infiniment petite, l la longueur du pendule, g l'intensité de la pesanteur, ou le double de l'espace parcouru par un corps pesant dans la première seconde de sa chute, π le rapport de la circonférence au diamètre : et comme les deux élémens, la longueur et la durée, se mesurent avec une exactitude extrême, le pendule offre un moyen rigoureux de calculer la pesanteur : si l'on met dans cette formule la longueur du pendule qui bat les secondes à Paris, et qui est 0^m, 9939, la valeur de $\pi = 3,1415926$ et $T = 1$, on trouve $g = 9^m, 81$.

D'après la formule ci-dessus, on voit :

1° Que les temps des oscillations sont comme les racines carrées des longueurs des pendules, et en raison inverse des racines carrées des intensités de la pesanteur;

2° Que pour deux pendules différens en longueur, et soumis dans un même lieu à l'action de la pesanteur, les durées des oscillations sont proportionnelles aux racines carrées des longueurs;

3° Que si l'on transporte un même pendule dans différens lieux, les durées des oscillations sont en raison inverse des racines carrées des intensités de la pesanteur dans ces lieux;

4° La même formule montre que les carrés des nombres d'oscillations faites par le même pendule, ou par deux pendules d'égale longueur, dans des lieux différens, pendant le même temps, sont proportionnels aux intensités de la pesanteur.

25. L'intensité de la pesanteur devient d'autant plus faible, que la distance à la surface de la terre est plus grande. En effet, il résulte des observations de Bouguer, qu'en prenant pour unité la longueur du pendule à secondes à l'équateur et au niveau de la mer, cette longueur devait être réduite à 0^m,9992 à Quito (hauteur de 2857 mètres); que sur le Pichincha, à 4744 mètres de hauteur, elle était encore moindre (0^m,9988), et d'après le numéro précédent, les intensités de la pesanteur sont dans les trois lieux comme les longueurs du pendule (1).

26. Le pendule offre encore le moyen de constater la variation de la pesanteur à différentes latitudes du globe.

Richer reconnut cette variation en 1672. Il vit qu'une horloge qui avait été réglée à Paris sur le temps moyen, retardait à Cayenne chaque jour d'une quantité constante, d'où il conclut que l'intensité de la pesanteur y était moindre. Bouguer s'assura de la même variation à Saint-Domingue, à Quito, etc. Cette observation importante a été depuis confirmée par un grand nombre de voyageurs. Il est bien constaté aujourd'hui qu'à mesure qu'on s'éloigne de l'équateur, on est obligé de donner plus de longueur au pendule, pour avoir des oscillations de même durée. Il en résulte que la pesanteur s'accroît de l'équateur aux pôles.

La connaissance de la longueur du pendule dans un grand nombre de stations conduit à la détermination de la figure de la terre.

A étant l'aplatissement, l la longueur du pendule à l'équateur, e l'excès de la longueur aux pôles, q étant les 5/2 du quotient de la force centrifuge par la pesanteur à l'équateur ou 0,00865, on a la relation $A = q - \frac{e}{l}$.

Il n'est pas même nécessaire d'aller aux pôles, parce qu'il existe une relation entre la longueur du pendule à diverses latitudes, qui est $l' = l + e \sin^2 \lambda$, l' étant la longueur du pendule dans le lieu dont la latitude est λ, l et e ayant la même signification que dans l'équation précédente. En appliquant ces formules aux observations faites dans différentes contrées, on obtient environ 1/290 pour l'aplatissement.

L'aplatissement auquel a conduit la théorie de la lune est 1/303 — L'ensemble des mesures géodésiques fournissent à peu près 1/300.

Pour que la figure de la terre déterminée par le pendule, le soit avec exactitude, il faut des observations beaucoup plus multipliées que celles qui ont été faites. Parce que non seulement la distance au centre de la terre, mais aussi la nature du terrain, la présence des montagnes, exercent une influence sur le nombre des oscillations. Il est clair qu'un pendule oscillera plus vite sur un terrain compacte que sur un terrain léger. (*Voy.* les ouvrages de géodésie.)

Il est reconnu depuis assez long-temps que la valeur absolue de la pesanteur augmente d'environ 1/175 de l'équateur aux pôles; ce nombre est supérieur à 1/289 que nous avons obtenu par l'examen de l'influence de la force centrifuge sur l'intensité de la pesanteur. Ce fait prouve donc de la manière la plus évidente que le diamètre de la terre à l'équateur est plus grand que celui des pôles. Ainsi deux causes tendent à affaiblir l'action de la pesanteur à l'équateur : une plus grande force centrifuge et un plus grand éloignement du centre du globe.

27. L'expérience montre encore que, quelle que soit la matière du pendule, pourvu que la longueur reste constante, le temps des oscillations est le même; nouvelle preuve que tous les corps sont également sollicités par la pesanteur, vérité démontrée par des expériences directes.

(1) Si l'on fait $T = 1$ dans la formule $t = \pi\sqrt{\frac{l}{g}}$, on a $1 = \pi\sqrt{\frac{l}{g}}$. De même, on aura $1 = \pi\sqrt{\frac{l'}{g'}}$, d'où $l : l' :: g : g'$.

28. *L'intensité de la pesanteur diminue dans l'intérieur de la terre.* En effet, soit un point m (*fig.* 5), ce point sera attiré vers la surface par la matière située au-dessus de lui, et vers le centre par la matière située au-dessous. D'après cela, l'intensité doit aller en diminuant depuis la surface où elle est à son maximum, jusqu'au centre où elle est nulle. Le calcul montre que cette variation a lieu *en raison directe de la distance au centre.*

Il faut d'abord démontrer qu'un point placé dans l'intérieur d'une enveloppe, dont la matière agit proportionnellement à la masse et en raison inverse du carré de la distance, reste en équilibre. Soit un point m (*fig.* 4), menons par ce point deux lignes $a\,c$ et $b\,d$, qui interceptent sur l'enveloppe deux cordes infiniment petites; concevons deux élémens dont chacun ait une de ces cordes pour diamètre, ils seront entre eux comme les carrés de ces diamètres; et leurs actions sur le point C seront $\frac{\overline{a\,b}^2}{\overline{m\,p}^2}$ et $\frac{\overline{b\,c}^2}{\overline{t\,m}^2}$, l'intensité à l'unité de distance étant représentée par l'unité. Il est facile de démontrer, par la comparaison des triangles $a\,b\,m$ et $d\,c\,m$, que ces deux actions sont égales. Ainsi le point reste en équilibre.

Supposons maintenant le point m dans une sphère pleine. Par ce point, traçons une sphère concentrique à la première; cette sphère agit comme si toute la matière était réunie à son centre. L'attraction de cette sphère sur le point m sera proportionnelle à la masse $\frac{4\pi r^3}{3}$, et en raison inverse du carré de la distance r. Ainsi elle sera $\frac{4\pi r^3}{3\,r^2}$, ou $\frac{4\pi r}{3}$.

Application du Pendule aux Horloges.

29. Galilée observa, vers 1602, que les petits arcs d'un pendule sont sensiblement parcourus dans le même temps : il conçut l'idée d'utiliser cette régularité pour les observations astronomiques ou physiques; mais c'est particulièrement à Huyghens qu'on en doit l'emploi dans les horloges.

On sait qu'une horloge est formée par la réunion de plusieurs roues qui s'engrènent les unes dans les autres; les nombres des dents de ces roues sont dans les rapports qui existent entre les divisions adoptées pour la mesure du temps. Ces diverses roues sont tellement disposées que, lorsqu'une d'elles est mise en mouvement, toutes les autres marchent en même temps. On enroule autour de l'un des axes une corde à laquelle est suspendu un poids qui tend à faire tourner toutes les roues (*fig.* 27), et qui les ferait tourner précipitamment si l'on ne régularisait sa marche par un pendule.

La roue à laquelle ce pendule est adapté est connue en horlogerie sous le nom de roue de rencontre. Cette roue est taillée différemment des autres et de manière que le mouvement puisse en être dirigé par deux palettes fixées au pendule modérateur. La figure 25 représente l'appareil; la partie $C\ D$ est l'échappement : on voit par la figure même que, lorsque le pendule est dans une position verticale et en repos, les deux extrémités de l'échappement $C\ D$ s'interposent entre les dents de la roue et en arrêtent le mouvement. Mais si l'on écarte tant soit peu le pendule de la verticale, la roue, devenue libre, obéit à l'action du poids qui l'entraîne, jusqu'à ce que le pendule l'arrête par l'interposition de l'échappement. Dans un appareil convenablement disposé, cela arrive quand le pendule est au point le plus bas. Le pendule s'arrêterait aussi, si la vitesse acquise ne lui faisait parcourir un arc égal à celui qu'il a déjà parcouru; il s'échappe donc de nouveau; le poids fait tourner la roue; et ainsi de suite. Il est visible que, sans l'emploi du pendule, le mouvement du poids serait accéléré, comme celui de tous les corps soumis à l'action de la pesanteur; mais le pendule, par son échappement, le remet continuellement dans l'état de repos : de sorte qu'il n'a jamais que la vitesse que lui imprime la pesanteur dans le petit intervalle d'une demi-oscillation. De plus, cette disposition permet de concevoir comment le pendule, malgré le frottement et la résistance de l'air, continue son mouvement, l'action du poids lui rendant à chaque oscillation la vitesse perdue. La longueur du pendule est tellement déterminée, que le temps d'une oscillation est une seconde. La régularité de cet instrument ne serait par parfaite si l'on ne conservait à la tige la même longueur, malgré les variations continuelles de la température à la surface de la terre. Nous verrons, au chapitre des dilatations, les procédés ingénieux imaginés par les artistes et les savans pour satisfaire à cette condition.

De l'Équilibre produit par la composition de plusieurs forces appliquées à un même point matériel ou à plusieurs points matériels liés entre eux invariablement; du centre des forces parallèles; du centre de gravité; des couples.

30. L'action de plusieurs forces agissant simultanément sur un ou plusieurs points matériels présente deux cas qu'il est nécessaire de considérer. Il est possible que ces forces communiquent un mouvement au système, ou que, s'entre-détruisant, elles laissent le corps en repos. Ce repos, produit par la compensation de plusieurs forces, est désigné par le nom d'*équilibre.*

Deux forces égales, appliquées dans des direc-

tions opposées à un même point matériel, offrent le cas le plus simple de l'équilibre; si les deux forces sont inégales, le point matériel se meut dans le sens de la plus énergique, comme s'il était sollicité par leur différence.

Le cas de l'opposition directe est le seul où l'équilibre soit possible entre deux forces égales. Si leurs directions font un certain angle, leurs efforts conspirent en partie, et le point matériel est sollicité par une force unique, dont la direction et l'intensité sont déterminées par la règle du parallélogramme des forces (nº 17).

La résultante des deux forces jouit d'une propriété que nous devons faire connaître, à cause de son importance. Les lignes CD et CE (*fig.* 9), abaissées d'un point quelconque de la résultante AB, perpendiculairement sur les directions des deux composantes AD et AE, ont leur longueur en raison inverse de l'intensité de chacune des forces vers lesquelles elles se dirigent : cette proposition se démontre par la géométrie. Par exemple, si les forces p et q sont représentées par les nombres 4 et 5, les perpendiculaires CD et CE le seront par les nombres 5 et 4, et en général, on aura la proportion $p : q :: CE : CD$, d'où $p \times DC = q \times CE$. On appelle *moment statique* d'une force par rapport à un point C, le produit de cette force par la longueur de la perpendiculaire abaissée de ce point sur sa direction.

Le cas d'un seul point matériel est un cas abstrait, qu'il était utile de considérer pour arriver aux cas plus composés que présentent les corps. Il n'existe aucun corps dont les diverses parties soient liées entre elles d'une manière invariable; mais la rigidité qui caractérise les corps dans l'état de solidité, exige que leurs parties se transmettent mutuellement l'impression des forces qui sollicitent quelques unes d'entre elles. Quant aux liquides, l'impénétrabilité des parties en contact règle la répartition des forces qui leur sont appliquées.

Prenons quelques exemples. Soient deux forces p et q (*fig.* 26) situées dans un même plan et appliquées aux points a et a' d'un corps solide; pour en avoir la résultante, il faut considérer que le point de l'application d'une force peut être transportée en un point quelconque de la direction de cette force, pourvu que ce point soit lié au premier par une ligne inflexible : les deux forces étant, par supposition, dans le même plan, elles se rencontreront en un point c; il ne restera donc qu'à construire sur les directions ac et $a'c$ un parallélogramme, pour avoir l'intensité et la direction de la résultante.

Le cas de deux forces parallèles n'échapperait pas à la solution précédente, parce que la règle de statique est indépendante de l'angle que font les directions des deux forces, en sorte qu'elle est encore vraie pour un angle nul. Ainsi nous avons dit plus haut que les longueurs des perpendiculaires CD et CE (*fig.* 9), abaissées d'un point de la résultante AB sur les directions des composantes, sont en raison inverse de ces composantes. Ce même rapport existe pour la *figure* 33, où les deux forces sont parallèles. Pour le point c d'application de la résultante, il faudra diviser aa' en deux parties réciproquement proportionnelles aux intensités des forces p et q : la résultante r sera égale à leur somme. Pour établir l'équilibre, il n'y aura qu'à placer au point c une force r' égale, mais dirigée en sens opposé. Si les deux forces étaient dirigées en sens contraire, comme l'indique la *fig.* 34, la résultante deviendrait égale à leur différence; elle agirait dans le sens de la plus énergique, et son point d'application serait hors des points d'application des composantes. Nous supposons ici les deux forces différentes en intensité et dans le même plan. Si elles étaient égales, ou si elles agissaient dans deux plans différens, il n'y aurait pas de résultante; dans ces deux cas, il faudrait détruire chaque force séparément.

Maintenant que nous savons trouver la résultante de deux forces, dans tous les cas possibles, nous pouvons en composer un nombre quelconque. Si toutes les forces sont parallèles et dirigées dans le même sens, on composera d'abord deux forces, ensuite la résultante trouvée avec une autre force, et ainsi de suite; la résultante définitive sera parallèle à la direction commune : si une partie des forces agit dans un sens, et une autre partie dans un autre sens, on cherchera la résultante particulière à chaque groupe, on verra si ces résultantes sont égales ou inégales; dans le premier cas, il n'y aura pas de résultante unique; dans le second, elle sera égale à la différence des deux résultantes particulières. Le point d'application s'en trouvera par la règle indiquée plus haut. Le système sera maintenu en équilibre par l'application d'une force égale à la résultante et dirigée en sens opposé.

31. Pour faire comprendre ce qu'on entend par *centre de gravité*, disons un mot du *centre des forces* parallèles : pour cela, supposons qu'on ait déterminé le point A d'application de la résultante d'un certain nombre de forces parallèles (*fig.* 35); si toutes les forces, sans changer d'intensité, et sans cesser d'être parallèles, prennent simultanément une autre direction, leur résultante conservera la même grandeur : seulement la direction dans l'espace en sera changée : elle traversera le corps suivant une autre droite. On démontre en statique que toutes les résultantes ainsi déterminées concourent en un seul point A, que l'on appelle *centre* des forces parallèles. Il est clair que si l'on fixe ce point, l'équilibre sera établi, quelle que soit la direction des forces.

Appliquons ces résultats aux corps pesans : la pesanteur agit perpendiculairement à la surface de la terre. Ainsi un corps est sollicité par un nombre infini de forces parallèles entre elles et perpendi-

culaires au lieu de l'observation. Les efforts partiels de la pesanteur de toutes les particules d'un corps composent une somme dont la résultante est le *poids* de ce corps. Cette résultante devre, d'après ce qui précède, quelle que soit la position du corps, passer par un point unique : ce point est le *centre de gravité*.

Si ce point est fixe, on pourra faire tourner le corps autour de lui, sans que l'équilibre soit détruit. L'équilibre sera encore établi quand le point fixe se trouvera dans la droite verticale passant par le centre de gravité.

On conçoit de même qu'un fil (*fig.* 24) à l'extrémité duquel est fixé un corps pesant, se tiendra vertical dans le cas de l'équilibre, et que le prolongement en passera par le centre de gravité du corps. Ce petit appareil porte le nom de *fil à plomb ;* on s'en sert, comme chacun sait, à une infinité d'usages, à s'assurer de la verticalité d'un mur, à déterminer le centre de gravité d'un corps, etc. Pour cette dernière détermination, on suspend successivement le corps par deux points différens : il est visible que le prolongement du fil de suspension à travers le corps, dans chaque expérience, fait connaître ce point, car l'équilibre ne peut être établi sans que le fil passe par le centre de gravité : ce dernier est donc le point de concours des deux directions du fil.

La position du centre de gravité dans les corps *homogènes* ne dépend que de leur forme. Dans les corps *hétérogènes*, c'est-à-dire composés de parties dissemblables, elle dépend en outre de la distribution de la matière. Par exemple, le centre de gravité d'un aréomètre se trouve dans la partie inférieure, parce que cet instrument est en général formé d'un tube de verre, dont la partie inférieure est remplie de mercure ou de plomb, matières beaucoup plus denses que le verre.

Le centre de gravité d'une ligne droite est au milieu de sa longueur ; celui d'un cylindre à bases parallèles, au milieu de l'axe ; celui d'un parallélogramme, au point de concours des deux diagonales; celui d'un cercle, d'une sphère creuse ou pleine au centre. Tout cela est évident.

On démontre, par des propositions de géométrie fort simples, que le centre de gravité d'un triangle *A B C* (*fig.* 28) se trouve en *G* situé aux deux tiers à partir du sommet *A* sur la ligne *A H* qui joint ce sommet au milieu de la base. — On trouve par des moyens analogues que le centre de gravité d'une pyramide triangulaire ou non, est situé sur la ligne qui joint le sommet au centre de gravité de la base, aux trois quarts de cette ligne à partir du sommet.

Soit *A B C* (*fig.* 38) un double cône pouvant tourner autour d'un point fixe *C*, et dont le centre de gravité est en *C*. Dans la position *A B C*, où le centre de gravité est au-dessus du point fixe, l'équilibre est dit *instable*, parce que le cône, pour peu qu'il soit écarté de cette position, fait la bascule et n'y revient plus. Dans la position *A B C*, l'équilibre est dit *stable*, parce que le cône écarté d'un côté ou de l'autre de sa position, tend toujours à y revenir. Ce résultat est général, quel que soit le corps.

Nous ne parlons ici des centres de gravité, dont l'étude est du ressort de la statique, que parce que la notion nous en sera utile dans la suite.

Nous citerons pour le moment quelques conséquences simples : un corps solide posé sur un plan horizontal est en équilibre, si la verticale qui passe par le centre de gravité rencontre le plan par un des points sur lesquels le corps pose, ou dans l'espace que ces points embrassent. Un homme ne se soutient bien qu'autant que la verticale, passant par son centre de gravité, tombe dans l'espace quadrangulaire compris entre les contours extérieurs de ses deux pieds. Tous les mouvemens que fait l'homme près de tomber, tendent toujours à le remettre dans cette position. L'art du danseur sur corde, la manière d'assurer la stabilité des hautes voitures, etc., se rapportent encore à la théorie des centres de gravité.

32. Deux forces égales, parallèles et opposées, forment ce qu'on appelle un *couple*. La *figure* 29 en présente un exemple. Il n'y a pas d'équilibre possible entre les forces *H B* et *H' B'*, quoiqu'elles soient égales. Elles tendent à faire tourner la ligne *B B'* jusqu'à ce que tout soit dans la position *H B B' H'* (*fig.* 30.).

De quelques machines simples.

33. Nous avons déjà donné la définition du repos, du mouvement absolu ou relatif ; nous avons dit ce qu'on entend par résultante de plusieurs forces : nous entrerons donc tout de suite dans les détails relatifs aux machines.

On appelle en général machine un instrument propre à transmettre l'action d'une ou de plusieurs forces.

La force dont on dispose est la *puissance :* la force qu'on veut vaincre ou à laquelle on veut seulement faire équilibre, est la *résistance*.

La puissance et la résistance ne sont pas opposées directement l'une à l'autre ; car alors il n'y aurait d'équilibre possible que dans les cas de l'égalité des deux forces.

On décompose la résistance à vaincre, de manière qu'une partie de son énergie soit supportée par un ou par plusieurs points fixes. Au moyen de cette disposition, des forces très inégales peuvent se faire équilibre, comme on le verra plus loin.

Il existe plusieurs machines qui sont les élémens des autres machines, et sur lesquelles nous allons donner quelques notions élémentaires, mais suffisantes pour le but que nous nous proposons. Ces

machines sont : le levier, le plan incliné, la poulie, la vis, le coin et le treuil.

Du Levier.

34. Une barre mcn (*fig.* 31) inflexible, droite ou courbe et retenue par un point fixe c, forme ce qu'on appelle un levier. Le point fixe c est le point d'appui. On conçoit bien que les forces inégales p et r, appliquées aux extrémités m et n, puissent se faire équilibre.

Si le levier est droit (*fig.* 31), et si les deux forces p et r sont parallèles, les distances mc et cn, comprises entre le point d'appui et le point d'application de chaque force, se nomment les bras de levier.

Dans la figure, p représente la puissance, r la résistance. Il faut et il suffit, pour que l'équilibre soit établi, que la résultante des deux forces passe par le point d'appui c, et l'on démontre que pour que cette condition soit remplie, on doit avoir la proportion : $p : r :: cn : cm$.

C'est-à-dire que *dans le cas* d'équilibre, *la puissance et la résistance sont en raison inverse de leurs bras de levier ;* d'où il résulte que, par le moyen du levier, une faible force peut équilibrer et même vaincre une force considérable.

La charge supportée par le point d'appui est exprimée par la résultante des forces p et q. Dans le cas de la *fig.* 31, elle est égale à leur somme.

On distingue trois genres de levier : le levier du premier genre est celui dans lequel le point d'appui se trouve entre les points d'application des forces (*fig.* 31) (balance ordinaire, romaine, ciseaux, tenailles), le levier du second genre présente la résistance entre le point d'appui et la puissance (*fig.* 21) (barres employées à soulever les pierres, rames de bateaux, lesquelles ont leur point d'appui dans l'eau, etc.) ; enfin le levier du troisième genre est celui dont la puissance tombe entre le point d'appui et la résistance (*fig.* 22) (pincette, organes musculaires ; dans le dernier cas, le point d'appui se trouve à l'articulation autour de laquelle se fait le mouvement : la force musculaire est la puissance).

On a un exemple du levier du premier genre dans la balance (*fig.* 37). La balance ordinaire doit avoir ses deux bras de levier égaux, pour que des poids qui se font équilibre soient égaux. Cette condition n'est pas nécessaire dans les balances destinées aux recherches, et fort heureusement, car il n'est jamais possible d'y satisfaire avec une exactitude complète.

La méthode des doubles pesées est tout-à-fait indépendante de l'inégalité des bras de la balance. Elle consiste à placer le corps dont on désire connaître le poids, dans un plateau de la balance, et à établir l'équilibre avec de la grenaille de plomb, ou de toute autre manière. Quand cet équilibre est obtenu, on remplace le corps par des poids, et l'on établit de nouveau l'équilibre ; ces poids donnent celui du corps, puisqu'ils font, ainsi que lui, dans les mêmes circonstances, équilibre à une même quantité de matière. Nous apprendrons plus tard comment on tient compte de toutes les causes qui font que le même corps, pesé dans des temps différens, dans la même balance, peut bien ne pas donner toujours le même poids.

La *fig.* 37 représente un modèle de balance construite par M. Fortin. Cette balance est fort estimée pour les recherches de précision.

Le levier, ou le fléau AB, est en acier trempé ; on lui donne assez de solidité pour qu'il n'éprouve pas de flexion sensible par les poids qu'on lui fait supporter. On cherche à donner aux parties AC et BC', situées de part et d'autre du point G, centre de gravité du fléau, la plus grande similitude. Le point de suspension C est un peu au-dessus du centre de gravité ; de sorte que le fléau tend toujours à revenir dans la position la plus stable. Si le centre de gravité était au-dessus du point de suspension, la balance serait *folle*, c'est-à-dire qu'elle ne resterait que difficilement en équilibre. Pour que la mobilité du fléau soit très grande, on donne à la pièce de suspension C la forme d'un tranchant, qu'on fait en acier très dur et fortement trempé ; le tranchant repose d'ailleurs sur un plan d'acier bien poli. Pour rendre appréciables les moindres mouvemens du fléau, on y a fixé une aiguille CK, perpendiculaire à AB ; dans le cas d'équilibre, l'extrémité de cette aiguille répond au zéro d'un arc de cercle tracé en K.

Pour que les pesées soient exactes, il y a deux conditions à remplir : la première, c'est de rendre la balance très sensible ; on y parvient en faisant le tranchant du couteau de suspension très vif, et en donnant un grand poli au plan d'acier sur lequel il repose ; de plus, comme il faut que le couteau et le plan d'acier ne s'altèrent point par une pression continuelle, on dispose sous les bras du levier deux fourchettes F et F', qui, dans les intervalles des expériences, les soutiennent de manière à empêcher toute espèce de frottement. Ces fourchettes sont soulevées ou abaissées à l'aide d'une manivelle $H.L$.

La deuxième condition est que les points de suspension S et S' soient bien rigoureusement les mêmes dans les deux opérations de la double pesée. Car nous avons vu au commencement de cet article que la force nécessaire pour faire équilibre à une résistance donnée est d'autant plus faible, que le bras du levier auquel on l'applique est plus grand. Comme l'observateur, dans l'opération de la pesée, ne serait averti par aucun indice du déplacement d'un des points de suspension, il serait exposé à commettre de grandes erreurs. C'est pour obvier à

ce grave inconvénient que l'artiste a fait suspendre les plateaux par des couteaux croisés, en acier très dur (*fig.* 32).

Du Plan incliné.

35. Il a déjà été question du plan incliné, à l'article des lois de la pesanteur (*fig.* 2 et 14).

On ne peut soutenir un corps pesant, s'il est libre, qu'avec une force égale à son poids. Une force moindre le soutient sur le plan incliné. Soit un corps HK, placé sur le plan incliné GB (*fig.* 39) : qu'on mène par le centre de gravité G de ce corps la verticale GR; cette ligne représentera l'effort de la pesanteur appliquée à ce point, et que nous représenterons par R, qu'on décompose, d'après la règle du parallélogramme des forces, cette résultante en deux autres forces, l'une GD parallèle, et l'autre GF perpendiculaire au plan. La dernière sera détruite par la résistance du plan ; la première, que nous désignerons par P, agira seule pour faire glisser le corps et *sera à la résultante dans le rapport de* GD à GR; ou, vu la similitude des deux triangles GDR *et* ACB, *comme la hauteur* AC est *à la longueur* CB *du plan incliné*, c'est-à-dire qu'on aura $P = R\frac{AC}{CB}$.

Tel est le rapport qui doit exister entre la puissance appliquée dans la direction BC, et le poids du corps, pour que celui-ci ne puisse pas glisser le long du plan. Pour une force horizontale, on aurait $P = R\frac{AC}{AB}$.

On voit donc qu'avec un plan incliné il est possible de faire mouvoir un poids considérable par le moyen d'une force qui l'est beaucoup moins. Aussi le plan incliné est-il souvent employé dans les arts.

De la Vis.

36. Pour définir convenablement la vis, il faut expliquer ce qu'on entend par *hélice*. Pour cela on développe le cylindre droit $ABCD$ (*fig*, 23), suivant le rectrangle $ABCD$, et l'on partage la hauteur en un certain nombre de parties égales ; puis l'on mène les diagonales Ag, bc, de, fe ; si l'on enroule maintenant ce rectangle sur le cylindre, les diagonales engendreront une courbe continue : c'est une *hélice*. On voit que cette courbe est partout également inclinée à l'horizon, puisque les lignes Ag, bc sont parallèles. ap est le pas de l'hélice.

Cela posé, la vis est un filet saillant appliqué sur un cylindre, et engendré par un triangle, un parallélogramme, ou toute autre figure, qui, s'appuyant par sa base sur une génératrice, tourne autour de l'axe du cylindre en descendant le long de l'hélice. Dans le mouvement, chacun des points du triangle décrira une hélice qui aura le même pas que l'hélice primitive. Ce sera aussi le pas de la vis. La génération de l'écrou est la même.

Considérons d'abord un seul point a placé sur une hélice et sollicité par une force verticale p et une force horizontale q. Ce point pourra être regardé comme étant sur un plan incliné dont la hauteur est h le pas de la vis, et dont la base est $2\pi r$, r étant le rayon du cylindre. Nous aurons d'après le n° 35 : $q : p :: h : 2\pi r$. Nous avons supposé la force q immédiatement appliquée au point a; si par ce point nous menons un rayon du cylindre que nous prolongerons jusqu'à ce qu'il soit égal à R, on pourra le regarder comme un levier inflexible, et remplacer la force q par la force q', pourvu qu'on ait $q' : q :: r : R$. Mais on a $q : p :: h : 2\pi r$. Multipliant par ordre ces deux proportions, on a $q' : p :: h : 2\pi R$.

Le rayon r du cylindre ayant disparu, la condition est donc la même pour toutes les hélices ayant le même pas, quel que soit le cylindre sur lequel elles sont tracées. Il est donc d'après cela facile de savoir la condition d'équilibre de la vis. Supposons l'écrou sollicité par deux forces, l'une verticale P, l'autre horizontale Q. Ces forces peuvent être décomposées en plusieurs autres, p, p', p'' et q, q', q'', qui, appliquées aux différens points de contact, les tiennent en équilibre. On aura donc la suite des proportions $q : p :: h : 2\pi R$; $q' : p' :: h : 2\pi R$; d'où $q + q' : p + p' :: h : 2\pi R$ ou $Q : P :: h : 2\pi R$.

C'est-à-dire que dans le cas d'équilibre, la *puissance est à la résistance comme la hauteur du pas de la vis est à la circonférence, que la puissance tend à faire décrire à son point d'application.*

Tantôt la vis est fixe et l'écrou est mobile, c'est ce cas qui est représenté par la figure 40 ; tantôt la vis est mobile et l'écrou fixe (*fig.* 41).

De la Poulie.

37. Une poulie est une roue circulaire, creusée en gorge à sa circonférence, et traversée à son centre par un axe autour duquel elle peut tourner. Si l'axe est retenu fixement *la poulie est fixe*; la poulie est *mobile* quand l'axe est libre ; alors elle peut se mouvoir dans l'espace en même temps qu'elle tourne autour de son axe.

Considérons la poulie fixe (*fig.* 43). Supposons qu'une corde flexible $ABCD$ soit passée dans la gorge de la poulie et embrasse une portion de sa circonférence ; appliquons à l'extrémité A la puissance, et la résistance à l'extrémité D. Ces forces agiront suivant les tangentes, et il est visible que l'équilibre ne pourra être établi que dans le cas de l'égalité de la puissance et de la résistance. La résultante des deux forces passe par le centre de la poulie, et est détruite par la résistance de l'axe.

De plus, si les forces sont parallèles, cet axe supporte un effort égal à leur somme. La poulie fixe offre le moyen de changer la direction d'une force sans en altérer l'intensité.

Dans la *poulie mobile* (*fig.* 44), la corde est attachée par une extrémité à un obstacle invincible F; à l'autre extrémité est appliquée la puissance P; enfin, le poids à soulever est suspendu à l'extrémité H de la chape. Le point F supporte une pression égale à la force P, appliquée à l'autre extrémité. L'équilibre sera donc établi si la résistance est égale à la résultante de deux forces égales à P. Si les deux forces sont parallèles, $R = 2\,P$; c'est le cas le plus favorable à la puissance.

Considérons maintenant un système de poulies mobiles A, A' et A'' (*fig.* 47). Appelons r, r', r'' les rayons $A\,C$, $A'\,C'$ et $A''\,C''$; c, c', c'' les cordes des arcs sous-tendus $C\,D$, $C'\,D'$ et $C''\,D''$. Si X est la tension du cordon de A, on aura $R : X :: c : r$; pour le cordon de la poulie suivante, $X : Y :: c' : r'$; et enfin pour le troisième, $Y : P :: c'' : r''$.

Multipliant par ordre, il vient $R : P :: c\,c'\,c'' : r\,r'\,r''$; le cas le plus favorable sera celui où tous les cordons seront parallèles (*fig.* 45), et pour lequel $c = 2\,r$, $c' = 2\,r$, etc.

Dans ce cas on a $R : P :: 2.2, 2 : 1$, *ou, en langage ordinaire, la résistance est à la puissance, comme* $2\,n$ *est à l'unité*, n étant le nombre des poulies.

Une moufle est un système de poulies assemblées dans une même chape (*fig.* 45 et 46). Cet appareil est très utile pour soulever de grands fardeaux avec de petites forces. Dans la *fig.* 45 toutes les poulies sont mobiles, à l'exception de celle sur laquelle agit directement la puissance. Dans la *fig.* 46 les poulies inférieures sont mobiles, les supérieures fixes.

Le calcul montre que la puissance P est égale à la résistance R, divisée par 2^n dans le cas de la *fig.* 45, et par $2\,n$ dans le cas de la *fig.* 46, n étant le nombre des poulies mobiles. (*Voyez* les ouvrages de statique.)

Du Treuil.

38. On appelle treuil, tour ou cabestan, une machine qui consiste en un cylindre d'un diamètre quelconque, auquel est attachée une roue d'un plus grand diamètre. Le centre de cette dernière roue est dans l'axe du cylindre, et son plan lui est perpendiculaire. Les *fig.* 64, 65, 66, 67, représentent cette machine sous les formes les plus usitées. Le cylindre $A\,B$ est terminé par deux cylindres plus petits, nommés *tourillons*, enchâssés dans des appuis fixes, de manière qu'il n'a de mouvement libre qu'autour de son axe. Une corde enroulée sur le cylindre y est fixement attachée par une de ses extrémités, et est liée à la résistance par son autre extrémité. La puissance agit en un point quelconque de la grande roue, tangentiellement à sa surface (*fig.* 66). Quelquefois la puissance est appliquée à une manivelle; mais si la direction de la manivelle est perpendiculaire au rayon du cylindre $A\,B$, le même rapport existe toujours entre la puissance et la résistance. On démontre en statique que, pour que l'équilibre soit établi dans le treuil, il faut que la puissance soit à la résistance comme le rayon du cylindre $o\,m$ est au rayon de la roue $E\,D$, ou à la longueur de la manivelle $F\,H$; c'est-à-dire qu'on a la proportion $P : R :: o\,m : E\,D$ ou $F\,H$.

Comme dans la pratique la corde a toujours un diamètre notable, il faut considérer la résistance comme agissant suivant l'axe de la corde, et augmenter le rayon du cylindre de celui de la corde. Cette circonstance diminue un peu l'avantage de la puissance.

Des propriétés générales des Fluides.

39. On distingue les fluides en liquides et en fluides élastiques. Les premiers subissent de faibles changemens dans leur volume, pour des variations considérables de pression. Les seconds, au contraire, dans les limites qui sont très étendues pour les uns, peu étendues pour les autres, occupent des volumes qui sont sensiblement en raison inverse des forces qui les compriment. C'est cette différence qui a fait donner aux premiers le nom de fluides incompressibles.

Le caractère principal d'un fluide se trouve dans la grande mobilité de ses particules. Ce caractère est offert par l'eau, par l'alcool, par l'air atmosphérique, etc.

De l'Équilibre des Liquides.

40. *Principe de l'égalité de pression.* — Ce principe, sur lequel repose l'hydrostatique, est une suite de la parfaite mobilité des particules des liquides; on le conçoit bien *à priori*; on le démontre aussi par l'expérience directe. Par exemple, qu'on prenne un vase cubique ou de toute autre forme (*fig.* 63), et qu'on dispose un piston sur chacune de ses faces, on verra que si l'on applique à un des pistons une force quelconque, il faudra appliquer aux autres des *forces égales* pour faire équilibre au premier, s'ils ont la *même base*, et des forces *proportionnelles aux bases*, si ces dernières sont *différentes*.

Il ne s'agit ici que des pressions exercées sur le liquide indépendamment de la pesanteur. La pression produite par cette dernière cause, sur les différens points du liquide, est proportionnelle à la distance entre le niveau et les points considérés; cette pression est évidemment aussi proportionnelle

à la densité du liquide et à l'intensité de la pesanteur; ainsi elle aura pour expression $h\,d\,g$; h étant la hauteur du niveau. C'est là la pression sur l'unité de surface, pour la surface b, c'est $h\,g\,d\,b$ (1).

Ce principe de l'égalité de pression est très important, puisque toutes les propriétés des liquides dans l'état d'équilibre en sont des conséquences.

La configuration des parois n'entre pour rien dans l'évaluation de la pression. Dans tous les cas où la hauteur et la nature du liquide, l'étendue de la base, sont les mêmes, la pression supportée par la base est la même aussi (*fig.* 56). Dans la *fig.* 62 *bis*, p représente un piston entrant à frottement dans la partie $m\,n\,r\,q$. L'équilibre, étant établi pour l'un des trois vases $A\,B\,m\,n$, $B\,C\,m\,n$, $E\,D\,m\,n$, aura lieu pour les deux autres. Il est bien entendu que les vases sont soutenus, et que la balance ne supporte que la pression exercée sur la base, et que chacun des trois vases est vissé successivement sur la partie $m\,n\,r\,q$. C'est là ce qu'on connaît sous le nom de *paradoxe hydrostatique*.

On a fait quelquefois une expérience fort curieuse, et dont l'explication est fondée sur ce qui vient d'être dit. Cette expérience consiste à faire crever un tonneau (*fig.* 52) à l'aide d'un tube dont le diamètre n'est que de quelques lignes. On remplit d'eau le tube ainsi que le tonneau; la pression ne dépendant que de la hauteur, celle qu'exerce le liquide du tube est égale à la pression qu'exercerait un cylindre du diamètre du tonneau. C'est encore sur la même propriété qu'est fondée la presse hydraulique. Supposons qu'on exerce une pression sur la colonne $C\,D$ (*fig.* 49), cette pression se transmettra à tous les points de la surface $A\,B$ avec son intensité.

Cet instrument étant beaucoup employé aujourd'hui, nous le décrirons ici d'une manière succincte.

Pascal (*Traité de l'Équilibre des Fluides*) a eu la première idée de la presse hydraulique. Un mécanicien anglais a appliqué le principe de Pascal, vers 1796, à la construction de cet instrument.

La *figure* W, pl. 7, est une section verticale de cette presse.

$A\,B\,C\,D$ est le cadre de la presse; $E\,F$, l'objet à comprimer; $H\,K$, une plaque de fonte pressée par un piston P contre une seconde plaque $M\,N$; p, piston de la pompe foulante qui sert à introduire l'eau destinée à pousser le piston P de la presse; $x\,x$, réservoir plein d'eau; r, arrêt qui limite la course du piston p; m, soupape qui permet à l'eau d'entrer dans le corps de pompe dans lequel se meut p; elle s'ouvre du dehors en dedans. En n se trouve une seconde soupape, par laquelle l'eau est injectée dans le canal $n\,l$; cette soupape s'ouvre aussi du dehors en dedans. On comprime d'abord l'objet le plus possible, sans faire jouer le piston p. Cette première opération est nécessaire afin d'éviter un travail long et pénible, la presse hydraulique ne comprimant que peu à la fois. Quand le mouvement du plateau de la presse se ralentit, on commence le jeu du petit piston p. A l'aide d'une disposition particulière on rend le mouvement de ce dernier vertical.

Pour empêcher l'eau de s'échapper par l'intervalle laissé entre le piston P et le cylindre qui l'enveloppe, on adapte une couronne en cuir $k\,k$, qu'on serre par un cercle métallique; ce dernier est tellement disposé, qu'il pénètre dans le cuir, et détermine un renflement. Par cette disposition, l'anneau pénètre d'autant plus dans le cuir, que la pression est plus forte.

Quand on veut retirer l'objet, on ouvre les soupapes n et m, et l'eau rentre dans le réservoir $x\,x$ par le canal $n\,l$.

(1) Pour avoir la pression sur un côté $A\,C$, *fig.* 53, il suffit d'admettre que la pression sur un élément est égale au produit de cet élément par sa distance à la surface supérieure du liquide. Soient deux points p et p' pris également distans du point m milieu de $A\,C$; soient $x = m\,p = m\,p'$, et h la hauteur de la colonne liquide $E\,C$, on aura (S étant la surface de l'élément p, et S' celle de l'élément p'), $\left(\frac{h}{2} + x\right) S$ pour la pression du point p, $S'\left(\frac{h}{2} - x\right)$ pour celle du point p', et $(S + S')\,\frac{h}{2}$ pour la somme des pressions aux points p et p', et conséquemment $A\,C \times \frac{h}{2}$ pour la pression supportée par la ligne $A\,C$. Enfin si l'on décompose cette force en deux, l'une horizontale, $A\,C \times \frac{h}{2} \cos l\,m\,v$, détruite par la force qui agit en sens inverse sur le côté $B\,D$, et l'autre verticale $A\,C \frac{h}{2} \cos l\,m\,r$, il ne restera que cette dernière, qui peut être représentée par $A\,C \times 1/2\,h \sin. A\,C\,E$ ou $A\,C \times 1/2\,h. \frac{AE}{AC}$ ou $A\,E \times 1/2\,h$, $(AB - CD)\ 1/2\,h$. Sur le côté $A\,B$ ce serait $h \times A\,B$.

Ce qui vient d'être dit pour les côtés $A\,C$ et $B\,A$, peut être étendu aux surfaces $A\,C\,F\,H$ et $A\,B\,L\,H$.

La somme des pressions exercées sur les diverses parois du vase est donc

$$h \times b.\,A\,B - (b.\,A\,B - b.\,C\,D)\ 1/2\,h$$

ou $\frac{h}{2}(b.\,A\,B + b\,C\,D)$.

Si l'on prend un vase ayant h pour hauteur et $\frac{b.\,A\,B + b.\,C\,D}{2}$ pour base, le poids du liquide contenu sera $h \times \frac{b.\,A\,B + b.\,C\,D}{2}$; ainsi le poids du liquide est égal à la somme de toutes les pressions.

Nous avons supposé un seul piston à la pompe foulante. Dans certaines presses, il y en a deux de diamètres différens.

Nous ne voulons donner ici qu'une idée de la presse hydraulique. On fait aujourd'hui, dans l'industrie, des applications nombreuses de cet instrument. *Voyez* pour plus de détails les traités de machines.

L'avantage de la presse hydraulique est de pouvoir exercer une pression très forte à l'aide d'une force très faible. Par un calcul assez simple, on se forme une idée de la force exercée sur la plaque *H K*.

Supposons que le piston *p* soit mu par un homme, à l'aide d'un levier; supposons que le rapport des deux bras de levier soit celui de 10 à 1 : l'effort d'un homme de moyenne force est au moins de 30 kilogr. : ainsi la pression exercée sur le piston *p* est 300 kil. Soit le rapport 1/20 entre les deux bases des pistons, la pression exercée sur la base totale de *P* sera 300 × 20, ou 6000 kilogr. On peut beaucoup la multiplier en agrandissant le bras du levier et la base du piston *P*.

41. Il résulte de la nature des fluides, que si l'on décompose la pression exercée sur chaque point des parois d'un vase en deux forces, l'une horizontale, l'autre verticale, les forces horizontales d'un même niveau se détruisent, et c'est ce qui fait que le vase reste en repos; de sorte que si l'on perçait une des parois, la pression devenant nulle en ce point, le vase serait poussé en sens contraire par l'effet de la pression opposée. On peut constater ce résultat d'une manière fort simple. Qu'on adapte à un tube de deux pouces de diamètre environ, un fond en cuivre, auquel soient fixés deux autres tubes qui sont dans le prolongement l'un de l'autre et horizontaux, recourbés à angle droit dans un plan horizontal (*fig.* 57); que tout l'appareil soit rempli d'eau : si on le suspend à un fil de lin ou de soie, ou si on le pose sur un pivot, il prendra une position fixe; si ensuite on ouvre les deux robinets *R* et *R'*, le liquide s'écoulera, et chaque partie de l'appareil prendra un mouvement de rotation en sens opposé de la direction du jet correspondant. On pourrait encore fixer un vase cylindrique sur une lame de liége flottant sur l'eau : on verrait le vase se mouvoir en sens opposé de la section qu'on aurait pratiquée à la paroi verticale.

42. *Vases communiquans.* Si l'on remplit un siphon partout d'un même diamètre (*fig.* 48), en partie d'un même liquide, il est clair que la symétrie seule veut, pour qu'il y ait équilibre, que le liquide se tienne au même niveau dans les deux branches. La même égalité existera encore, quelle que soit la différence des diamètres (*fig.* 49); ce qui provient de ce que la pression d'un liquide ne dépend que de la hauteur du niveau n° 40.

43. Si chaque branche du siphon renfermait un liquide particulier, et que le mélange ne fût point opéré, *les hauteurs seraient en raison inverse des densités.* Il existe dans les anciens cabinets de physique des aréomètres à siphon fondés sur cette propriété. Ces instrumens ne conduisent qu'à des résultats peu approchés de la vérité.

La théorie des vases communiquans s'applique aussi au niveau des masses d'eau qui se trouvent à la surface de la terre; seulement, comme la température change avec la latitude et avec la profondeur, que le degré de salaison change aussi avec la latitude, il en résulte que l'eau de mer n'est pas un liquide d'une densité homogène. On conçoit donc que toutes les mers en communication ne présentent pas le même niveau.

44. On a encore mis à profit la propriété du siphon pour la construction d'un instrument connu sous le nom de niveau d'eau, qui sert à déterminer le plan tangent à la surface de la terre. Il est formé (*fig.* 54) d'un tube horizontal terminé par deux branches verticales *A* et *B*. Le tube horizontal et les deux branches verticales sont ordinairement remplis d'eau presque en totalité. De là la dénomination de niveau d'eau.

On a aussi construit un niveau à bulle d'air (*fig.* 55). Dans un tube légèrement courbé vers son milieu, on introduit un liquide ordinairement coloré; on y laisse une bulle d'air, qui, d'après sa légèreté, doit toujours se trouver à la partie la plus élevée du tube. L'instrument est bon si, lorsqu'il est placé sur un plan horizontal, le milieu de la bulle d'air répond toujours au zéro de la division tracée sur le tube même, quel que soit le sens dans lequel on le tourne. On détermine par la pratique l'inclinaison de l'axe, correspondante à un mouvement donné de la bulle d'air. (Cet instrument sert à constater l'horizontalité d'un plan, l'angle que fait un plan avec l'horizon, etc.)

45. *Une masse de liquide n'est en équilibre qu'autant que les molécules supérieures et libres forment une surface perpendiculaire à la force qui les sollicite.*

En effet, soit *a b c d* (*fig.* 51) la surface d'un liquide contenu dans un vase; soit *P R* la direction de la force qui sollicite les molécules liquides; une couche horizontale *b d* serait pressée par le poids des couches situées au-dessus d'elle. La molécule *b* ou *d* serait, d'après le principe précédent, pressée avec la même force, et conséquemment déplacée, puisqu'il n'y a rien qui la retienne. Il en serait de même des autres molécules qui viendraient prendre la place de cette molécule, jusqu'à ce que toute la surface fût devenue perpendiculaire à la direction de la force *P R*.

Il résulte de là que si la terre était en repos, et si elle n'était sollicitée que par la pesanteur, la surface des mers serait sphérique, la rotation de la terre détermine l'accumulation d'une plus grande quantité de matière à l'équateur. (Voyez la *Force* centrifuge.) Près des grandes montagnes, la surface des eaux se soulève et s'incline sur la véritable verticale.

L'action de la lune détermine aussi alternativement l'élévation et l'abaissement des eaux de l'Océan. C'est là ce qui occasione les oscillations périodiques du flux et du reflux.

C'est par des combinaisons d'action de ce genre que la surface des liquides est convexe ou concave dans les tubes étroits. (Voyez les *Tubes capillaires.*)

Dans ces différens cas, la surface dans l'état d'équilibre est perpendiculaire à la résultante de la pesanteur et des autres forces qui agissent sur le liquide.

La courbure de la surface des mers est toujours sensiblement sphérique. Aussi, dans les temps les plus favorables, n'aperçoit-on pas les vaisseaux à plus de six lieues. Mais, vu la grandeur du rayon de la terre, les forces normales des points peu éloignés sont presque rigoureusement parallèles; c'est pour cela que dans nos pièces d'eau la surface diffère infiniment peu d'une surface plane.

Deux liquides non susceptibles de s'unir doivent se ranger l'un au-dessus de l'autre, de manière que la surface commune soit horizontale. En effet, supposons que la surface du liquide le plus pesant ait la forme $a\ b\ c\ d$ (*fig.* 40 *bis*); tirons l'horizontale $d\ e$. Nous pouvons négliger la pression exercée sur la ligne $e\ c\ d$, puisqu'elle est la même dans toute l'étendue de cette ligne. Il n'en sera pas de même d'un point de la ligne $c\ b$, du point b, par exemple : en effet, si d est la densité du liquide $a\ b\ c\ d\ f\ g$, d' celle du liquide $A\ B\ a\ b\ c\ d$, m la surface de l'élément b, h la hauteur $b\ c$, on aura $h\ d'\ m$ pour la pression dans le sens $k\ b$, et $h\ d\ m$ pour la pression dans le sens $a\ b$. Ces deux forces ne seront égales que pour $d = d'$. Ainsi, dans le cas dont il est question, l'équilibre ne peut exister qu'autant que la surface $a\ b\ c\ d$ sera horizontale.

46. *Principe d'Archimède.* — Ce principe consiste en *ce qu'un corps plongé dans un fluide perd de son poids une quantité égale au poids du volume de fluide déplacé.*

Pour concevoir ce principe, supposons une masse de fluide en équilibre; supposons de plus qu'on isole de la masse totale, par la pensée, une masse m prismatique et verticale : on voit, d'après ce qui précède, que la surface supérieure est pressée de haut en bas par le poids de la colonne qui pèse sur elle, et que la face inférieure est pressée de bas en haut par le poids de la colonne qui repose aussi sur elle; la différence des deux pressions verticales est donc égale au poids de la masse m. La pression de bas en haut est ce qu'on appelle *la poussée du fluide.* Les pressions horizontales éprouvées par la masse m se détruisent.

On constate cette *poussée* en plongeant dans l'eau un tube de verre, fermé à sa partie inférieure par un obturateur qu'on tient à l'aide d'un fil. Aussitôt que le tube est plongé à une certaine profondeur on peut lâcher le fil sans que l'obturateur tombe; si ensuite on verse de l'eau dans le tube, on voit l'obturateur tomber, aussitôt que la hauteur du liquide dans le tube est égale à la distance du niveau du liquide environnant. On conçoit d'après cela la pression que supporte le fond des vaisseaux, etc.

La solidification de la masse, sans changement dans la densité, ne troublerait pas l'équilibre : quelle que fût la position qu'on donnât à cette masse congelée, l'équilibre subsisterait. Donc la poussée a son point d'application au centre de gravité, comme la pesanteur qui lui est opposée; et si on remplaçait cette masse par un corps d'une densité plus grande, l'équilibre ne pourrait plus subsister; le corps tomberait, mais le poids en serait diminué du poids d'un pareil volume de fluide.

Pour constater le principe d'Archimède par l'expérience, on fixe à l'un des plateaux d'une balance un cylindre plein, et l'on place dans ce plateau un cylindre creux, dont la capacité intérieure est parfaitement égale au volume du premier; on établit l'équilibre, ensuite on plonge le cylindre plein dans l'eau; l'équilibre de la balance est troublé, on le rétablit en remplissant d'eau le cylindre placé sur ce plateau : le volume de cette eau est le même que celui du corps plongé, le poids en équivaut donc à la perte que subit ce dernier (*fig.* 69).

Si le corps est plus léger que le fluide, il monte jusqu'à ce que le poids du volume de fluide déplacé soit égal au sien.

Pour que l'équilibre d'un corps plongé dans un liquide soit stable, il faut que le centre de gravité de ce corps soit le plus bas possible et qu'il soit dans *la même verticale* que *le centre de gravité* du liquide déplacé.

Pour les corps flottans, l'équilibre exige toujours que le centre de gravité du corps flottant et celui du liquide déplacé soient dans une même verticale; mais il n'est pas nécessaire que le premier soit au-dessous du second, ce qui n'a d'ailleurs pas lieu pour les corps homogènes, puisque le centre de pression et le centre de gravité de la partie plongée coïncident, et que le dernier point est nécessairement au-dessous du centre de gravité de la masse totale du corps. Il suffit pour l'équilibre que le centre de gravité du corps flottant soit au-dessous d'un certain point qu'on nomme *métacentre.*

L'histoire des densités et des aréomètres est naturellement liée au principe d'Archimède; mais, comme les résultats des expériences, pour être exacts, doivent être rapportés à une même température, nous ne nous occuperons de ce sujet qu'après l'exposition des phénomènes de la chaleur. Pour la même raison nous remettons l'étude du baromètre.

Propriétés des Gaz.

47. Les fluides élastiques transmettent également la pression dans tous les sens; de plus, ils exercent

une pression plus ou moins considérable sur les parois des vases qui les renferment.

Le principe de l'égalité de pression dans tous les sens se vérifie à l'aide d'un appareil peu compliqué, et qui consiste en un cylindre creux *M n p q* (*fig.* A, *pl.* 5), dans les parois duquel on a percé à différentes hauteurs des ouvertures *r*, *r'*, *r''*, *r'''*. Dans ces ouvertures sont fixés des tubes recourbés en forme de siphons; chacun de ces siphons renferme un liquide qui se met de niveau dans les deux branches. Le cylindre est fermé dans sa partie supérieure, il est ouvert dans sa partie inférieure; en le plongeant dans un vase rempli d'eau, on voit, à mesure qu'il s'enfonce, le liquide monter également dans tous les tubes. Pour que ce cylindre pénètre dans le liquide, il faut nécessairement exercer sur la partie supérieure une certaine pression; l'air intérieur se trouve lui-même comprimé, et transmet la compression également à tous les points de sa masse.

On démontre d'une manière aussi simple la pression exercée par les molécules d'un gaz contre les parois du vase qui le renferme. Pour cela, on place sous la cloche d'une machine pneumatique, une vessie renfermant une faible quantité d'un gaz quelconque, d'air, par exemple : on voit dès les premiers coups de piston la vessie enfler et occuper bientôt tout le volume qu'elle occupe quand elle est complètement pleine d'air. A mesure que l'élasticité de l'air de la cloche diminue, l'air de l'intérieur de la vessie, ne pouvant s'échapper, obéit à la force répulsive qui anime ses molécules, presse contre les parois de la vessie, et en augmente nécessairement le volume.

Dans une masse d'air comme dans une masse liquide, il faut, pour l'équilibre, que tous les points placés sur une même ligne horizontale aient la même élasticité. Ainsi, deux points ne peuvent rester en repos qu'autant qu'ils se repoussent avec une force égale. Cette condition doit être remplie par toutes les couches horizontales.

L'équilibre instable dont nous avons parlé (n° 30) précédemment ne peut exister pour les gaz, à cause de la grande mobilité de leurs molécules.

On conçoit d'après cela que la masse immense d'air qui enveloppe la terre ne doit jamais rester en repos.

48. On démontre la pression de l'atmosphère par une expérience fort curieuse. Prenez deux hémisphères concaves; joignez-les, et afin d'en rendre la jonction plus facile et plus complète, placez un cuir mouillé entre les deux bords; ensuite faites le vide, en ayant soin de presser sur l'hémisphère supérieure. Si vous attendez que le vide soit parfait, et si vous enlevez la sphère après avoir fermé le robinet qui communique avec la machine pneumatique, il faudra les plus grands efforts pour séparer les deux hémisphères. Cet effet ne peut être attribué qu'à la pression atmosphérique; car si vous ouvrez le robinet, l'air rentre, et les deux hémisphères se séparent avec facilité. Cette expérience est due à Otto de Guerich.

49. Dans une masse d'air ou de tout autre fluid élastique en équilibre, la force élastique dan chaque point est égale à la pression. En effet, soi (*fig.* 52 *bis*) un vase *A B C D* ouvert par la partie inférieure *A B*, et fermé en *C D* par le moyen d'une vessie mouillée : qu'on ferme la partie *A B*, la vessie restera toujours tendue; le ressort de l'air intérieur est donc égal à la pression extérieure. Qu'on place le vase sur une machine pneumatique, et qu'on fasse le vide; dès les premiers coups de piston, le ressort de l'air du vase, étant diminué, ne pourra plus faire équilibre à la pression atmosphérique; la vessie fléchira et même finira par crever si le vide est porté assez loin.

50. La pression de l'atmosphère est la même dans tous les sens ; la pression qui agit de haut en bas soutient le mercure dans le baromètre. Qu'on ôte lentement le baromètre du bain dans lequel il est plongé, on verra le mercure s'y maintenir à une hauteur égale; il faut seulement, pour que cette dernière expérience réussisse, avoir soin d'effiler le tube à la partie inférieure, afin que l'air ne divise pas la colonne mercurielle. Ici le mercure n'est soutenu qu'en vertu de la pression de l'atmosphère qui s'exerce de bas en haut. Si l'on donne au baromètre la disposition *fig.* 70, le mercure s'y maintiendra encore à la même hauteur. Ainsi, la pression atmosphérique s'exerce de bas en haut, de haut en bas, et latéralement avec une égale énergie. *Voy.* le *Baromètre*, après l'exposé des phénomènes de la chaleur.

Mouvement des Liquides.

51. On a admis avec Torricelli que, pour un liquide dont les molécules sont douées d'une mobilité parfaite, s'écoulant par un petit orifice, et dont le mouvement n'est déterminé que par son propre poids, *la vitesse à l'orifice est celle qu'acquerrait un corps pesant tombé en chute libre dans le vide, depuis la surface supérieure jusqu'au niveau de l'orifice.* Comme la vitesse de tous les corps est *la même* dans le vide, celle de l'écoulement ne dépend ici nullement de *la nature* du liquide.

Si, par exemple, la hauteur de la colonne est de 15 mètres, la vitesse, au commencement de l'écoulement, sera (n° 15)

$$\sqrt{2\,g.\,h.} = \sqrt{2 \times 9^{m},8 \times 15}\ (1).$$

Cette expression montre que les vitesses d'écoulement *sont proportionnelles aux racines carrées des hauteurs.*

Ce résultat n'est pas changé, lorsque la surface supérieure et la surface de l'orifice sont également

(1) Les *clepsydres*, ou *horloges d'eau* des anciens, étaient fondées sur la loi de l'écoulement des liquides.

pressées ; ainsi il est encore vrai à l'air libre. Si la pression exercée à la surface supérieure est plus grande que celle qui est exercée à l'orifice, cet excès de pression peut être représenté par une colonne liquide, qu'il faut ajouter à la hauteur du liquide qui s'écoule, et alors la vitesse du liquide de l'orifice est due à la hauteur totale ; si la pression à l'orifice était plus grande qu'à la surface, il faudrait retrancher de la hauteur du liquide la colonne représentée par la différence.

52. Pour connaître la quantité de fluide écoulé, il faudra multiplier la vitesse par la surface de l'orifice ; le produit sera le nombre cherché pour l'unité de temps. Quand on fait l'expérience, on trouve dans certaines circonstances un résultat égal environ aux 5/8 du résultat calculé ; on a attribué cette différence au rétrécissement produit à la sortie du jet, et qu'on appelle *contraction de la veine fluide*. La veine conserve quelque temps le même diamètre, ensuite elle s'élargit en gerbe, en se mêlant avec l'air, *fig.* 62.

On peut ajouter que la portion de la veine qui n'est pas encore désunie par son mélange avec l'air, paraît dans un repos parfait ; que le jet, quelle que soit la forme de l'orifice, trace sensiblement une parabole ; que les autres élémens de la veine contractée sont modifiés par la forme de l'orifice : la hauteur du liquide et la forme des ajutages influent singulièrement sur le produit de l'écoulement ; par exemple, la quantité du liquide écoulé sera moindre si la paroi est convexe vers le liquide (*fig.* 50) ; elle sera plus grande dans le cas contraire.

(*Voyez* l'ouvrage de Belidor, avec les notes de M. Navier ; un Mémoire de M. Hachette, *Ann. de Chim. et de Phys.*, 1817-1818, et même journal, t. 43, un Mémoire de MM. Poncelet et Lesbros.)

On compare le produit de l'écoulement sous une pression constante et un orifice donné en minces parois au produit que fournirait la loi de Torricelli. Le rapport de ces deux produits donne celui de la section contractée à la surface de l'orifice ; et, comme cette dernière est connue, la première le sera aussi.

Pour que des expériences de ce genre soient exactes, la constance du niveau est de rigueur. On remplit cette condition de plusieurs manières, en faisant arriver dans le vase autant d'eau qu'il s'en écoule. Chacun peut imaginer des moyens pour cela ; mais il faut toujours éviter d'agiter d'une manière sensible, même la surface du liquide. (*Voy.* dans les ouvrages de mécanique pratique le moyen ingénieux imaginé par M. Prony.)

53. *Ajutages.* On donne le nom d'ajutages aux tuyaux qui s'ajustent aux orifices en minces parois, pour donner passage au liquide qui s'écoule.

Si l'ajutage a la forme que prend la veine depuis l'orifice jusqu'à la section contractée, il n'exerce aucune influence sur la dépense.

L'ajutage formé par deux cônes tronqués (*fig.* 49 *bis*) produit le maximum de dépense. Si la partie $a\,b\,c\,d$ a exactement la forme de la veine ; si $h\,k$ est égal à trois fois $e\,k$, et que $d\,c$ soit les 7/8 de $m\,n$, la dépense peut augmenter dans le rapport de 10 à 15.

Un ajutage cylindrique augmente aussi, mais moins que le précédent.

On peut diminuer la dépense, en produisant dans un ajutage quelconque de renflemens.

54. On appelle *pouce d'eau*, la quantité de ce liquide écoulé par un orifice circulaire d'un pouce de diamètre pendant une minute, sous une pression de sept lignes au-dessus du centre ; elle est de 28 livres, ou $12^{kil.}$, 706 ; ce qui équivaut à un cylindre d'un pouce de diamètre, et de 880 pouces de longueur.

Si l'on désire l'évaluation du produit d'un raisseau en pouces d'eau, on reçoit l'eau qu'il fournit par minute, et l'on en divise le poids par 28 livres : le quotient exprime le nombre de pouces d'eau.

Il est souvent impossible d'avoir directement l'eau écoulée ; on y supplée par l'observation de la vitesse. On jette sur la surface de l'eau une boule d'une densité telle qu'elle s'enfonce presque complètement, de cire par exemple, à laquelle on ajoute un corps plus dense ; on observe l'espace parcouru par minute avec une bonne montre à secondes ; et, en le divisant par 880, on a le nombre de pouces d'eau que fournirait par minute une section circulaire d'un pouce. Il faut remarquer que cette évaluation est relative à la surface ; la vitesse moyenne n'est que les 0,8 de la vitesse maximum, laquelle a lieu à la surface, à égale distance des deux bords.

Tout ce qui a été dit précédemment sur le pouce se rapporte à une pression de 7 lignes : si la hauteur était différente, on aurait recours à la règle de Torricelli ; on sait, d'après cette règle, que le produit est proportionnel à la racine carrée de la hauteur : 28 lignes de pression donneraient un produit double ; 63 en donneraient un triple, etc.

55. Nous dirons un mot des jets d'eau : soit un vase $A\,B\,C\,D$ (*fig.* 68) rempli d'eau jusqu'à la hauteur $A\,B$; le liquide qui s'écoule en E a la même vitesse que celle qu'acquerrait un corps tombé de cette hauteur : il doit donc s'élever à une hauteur $E\,F$ égale à $A\,B$; telle serait en effet la hauteur observée dans le vide ; mais elle est beaucoup moindre dans l'air, à cause de la résistance de ce fluide. Voici la formule déduite des expériences de Mariotte : H et H' étant les hauteurs de deux réservoirs, et h et h' étant celles qu'on veut donner aux jets d'eau, on a la proportion $H - h : H' - h' :: h^2 : h'^2$.

Une hauteur de 5 pieds 1 pouce produit un jet de 5 pieds. Veut-on connaître la hauteur du réservoir capable de fournir un jet de 100 pieds, on établira la proportion 5p, $1 - 5 : x - 100 :: 25 : 10000$, d'où $x = 133$ pieds et 4 pouces. La hauteur du réservoir devra donc être de 133 pieds 4 pouces. Pour que cette règle soit exacte, il faut don-

ner au jet une légère obliquité, afin que le liquide, en tombant, ne détruise pas une partie de la vitesse du jet ascendant.

56. Nous ne pouvons que donner peu de développemens à un sujet dont l'étude appartient à l'hydraulique. Cependant nous citerons quelques faits tirés d'un travail de M. Savart, qui change complètement les idées sur cette matière. D'après ce travail un jet vertical de haut en bas présente à son origine le diamètre même de l'orifice, et va en diminuant d'abord rapidement, puis plus lentement jusqu'à une partie qui est trouble et agitée. La partie trouble a une forme déterminée, non encore aperçue avant les expériences de M. Savart. La figure 71 représente toute la veine. On voit dans la partie trouble des renflemens également espacés, la moitié supérieure du premier renflement enveloppe l'extrémité inférieure du jet limpide. La longueur et le diamètre de ces ventres sont d'autant plus considérables que la charge est plus forte, et que l'orifice a un plus grand diamètre. Cette partie trouble se compose de gouttes qui tombent à la suite les unes des autres; on constate cette dernière propriété du jet, en réglant la vitesse de l'écoulement.

M. Savart est conduit à admettre que l'état oscillatoire de la veine est dû aux oscillations qui sont produites dans le réservoir par l'écoulement même, en sorte que la vitesse de l'écoulement n'est pas uniforme comme on le supposait, mais périodiquement variable.

L'élasticité du liquide devrait, dans cette hypothèse, avoir de l'influence sur les dimensions de la veine, quoiqu'elle n'en ait aucune sur le nombre des vibrations. En effet, la longueur de la partie continue du jet est d'autant plus grande que le liquide est plus compressible. Quant à la dépense elle paraît indépendante de la nature du liquide; la longueur du jet continue et la distance des renflemens se représentent dans le vide comme dans l'air.

M. Savart trouve encore que la constitution des veines lancées parallèlement ou obliquement à l'horizon, ne diffère pas essentiellement de la veine verticale dont il vient d'être question. (*Voyez* le mémoire original, *Ann. de Chim. et de Phys.*, t. 53 et 54.

Nous reviendrons sur ce sujet à l'Acoustique.

Tuyaux de conduite.

57. Ce sujet exigerait de grands développemens; nous ne citerons que les résultats principaux.

M. de Prony a obtenu la formule suivante pour la vitesse dans des tuyaux de fonte : $V = 26{,}79 \sqrt{\frac{DH}{L}}$; D est le diamètre, et L la longueur du tuyau; H la hauteur du niveau de l'eau au-dessus de l'extrémité du tuyau par laquelle s'écoule le liquide. Si cette dernière était submergée, il faudrait retrancher toute la partie submergée, V représente la vitesse de l'eau.

L'unité de grandeur est le mètre.

Cette formule n'est applicable que dans les cas où $\frac{D}{L}$ est plus petit que 1/100 et D plus grand que $0^m{,}01$. M. de Prony a vérifié cette formule par des tuyaux qui avaient jusqu'à 2,300 mètres de longueur.

Écoulement des Liquides par des tubes très fins.

58. Ce sujet est peu avancé. Voici quelques résultats d'expériences.

1° Les liquides non susceptibles de mouiller la substance des tubes, cessent de couler sous une pression plus ou moins forte, selon la longueur et le diamètre du tube.

Exemple : Sous une pression de 8^{mm}, 5, le mercure cesse de couler dans un tube de verre de 1^{mm}, 77 de diamètre et de 939^{mm} de longueur.

2° Les liquides susceptibles de mouiller la substance des tubes s'écoulent avec la même vitesse, soit que l'extrémité du tube plonge dans un liquide de même nature, soit qu'elle soit libre dans l'air, la pression étant la même.

L'augmentation de température accélère dans une proportion considérable la vitesse de l'écoulement des liquides qui mouillent les tubes; elle n'a pas d'influence sensible sur le produit de l'écoulement des liquides qui ne les mouillent pas. (M. Girard, *Ann. de Chim. et de Phys.*, t. 4, p. 146.)

Des Pressions latérales exercées par les liquides en en mouvement.

59. La pression exercée par un liquide contre les parois d'un tuyau dans lequel il coule, est moindre que dans l'état de repos. D'après D. Bernouilli, elle est égale à la hauteur du liquide au-dessus du point qu'on considère, moins la hauteur qui produirait la vitesse qui existe en effet en ce point. On voit d'après cela que cette pression sera d'autant plus grande que la vitesse sera plus diminuée. Il pourra même arriver que la pression soit négative, et qu'il y ait conséquemment *succion*. C'est le cas des ajutages cylindriques, qui, comme nous l'avons vu, déterminent une dépense plus grande qu'une ouverture d'un égal diamètre en minces parois. Si l'on adapte à un ajutage de ce genre un tube de verre (*fig.* 50 *bis*), plongeant dans du mercure, on verra, pendant l'écoulement par l'ajutage, le métal monter à une certaine hauteur dans le tube de verre.

Nous citerons ici une expérience fort remarquable de Venturi. Ce mécanicien distingué prit un

ajutage évasé ; il y adapta trois tubes verticaux, le premier à 10, le second à 56 et le troisième à 68 lignes de l'origine. Le mercure s'éleva dans le premier à 53 lignes, dans le second à 20,5 et dans le troisième à 7. La charge était 32,5 pouces. Comme 53 lignes de mercure équivalent à 62 pouces d'eau, il s'ensuit que la succion était presque double de la charge.

Mouvement des Gaz.

60. On admet aussi pour les gaz, dans l'écoulement en minces parois, le théorème de Torricelli.

D'après cela, on peut calculer la vitesse avec laquelle l'air se précipiterait dans le vide sous la pression ordinaire 0m,76.

On considère le gaz comme un liquide de même densité et soumis à une pression égale à son élasticité. La pression étant 32 pieds ou 10m,395 d'eau, et la densité de l'air rapportée à l'eau étant 0,0013, il s'ensuit que la colonne d'air sera de $\frac{10^m,395}{0,0013}$ ou de 7996 mètres. Or, d'après la formule $V = \sqrt{2gh}$, un corps acquerrait en tombant de cette hauteur une vitesse égale à 395m,8 par seconde. C'est là la vitesse avec laquelle l'air entre dans le vide. La densité de l'air étant proportionnelle à la pression, la vitesse avec laquelle ce fluide pénètre dans le vide est la même, quelle que soit cette pression.

Si une pression s'exerce à l'orifice en sens opposé de l'écoulement, on la retranche de la pression intérieure, et l'on opère sur la différence comme nous venons de le faire.

D'après la formule ci-dessus, les hauteurs d'où sont censées tomber les molécules des différens gaz sont en raison inverse des densités, et conséquemment les vitesses, pour pénétrer dans le vide, en raison inverse des racines carrées de ces densités. Ainsi la vitesse de l'hydrogène, qui est le plus léger de tous les gaz, est 1065 mètres par seconde, ce qui est double de la vitesse d'un boulet de canon.

Les lois sur l'écoulement des gaz n'ont pas encore été vérifiées par des expériences bien complètes.

Les gaz présentent, comme les liquides, une différence entre la dépense calculée et la dépense observée. M. d'Aubuisson (*Ann. de Chim. et de Phys.*, t. 3, p. 327) a trouvé par l'expérience que, pour l'air, le rapport entre la dépense réelle et la dépense théorique est 0,65 (écoulement par un orifice à très mince paroi), 0,93 (ajutage court et cylindrique), 0,95 (ajutage court, conique, peu ovale).

La vitesse de l'écoulement était de 21 à 48 mètres par seconde.

61. *Écoulement des gaz dans les tuyaux.* MM. Girard et Cagniard-Latour ont fait une série d'expériences sur l'air et l'hydrogène carboné, d'où ils ont conclu :

1° Que le gaz hydrogène carboné et l'air atmosphérique, amenés au même état de compression, se meuvent suivant les mêmes lois, et éprouvent exactement les mêmes résistances dans les mêmes tuyaux, et cela indépendamment de leurs densités spécifiques ;

2° Que la résistance qu'éprouvent des fluides aériformes à se mouvoir dans des tuyaux de conduite, est exactement proportionnelle au carré de leur vitesse moyenne ;

3° Enfin, qu'en conséquence de cette loi, et de celle du mouvement linéaire, les dépenses d'un gaz par une conduite donnée de grandeur uniforme, sont toujours en raison directe de la pression indiquée dans le réservoir qui alimente l'écoulement, et en raison inverse de la racine carrée de la longueur de la conduite par laquelle il s'opère.

62. *Écoulement par des tubes très fins.* M. Faraday (*Ann. de Ch. et de Ph.*, t. 10) a trouvé que les gaz les plus légers s'écoulent le plus vite sous de fortes pressions, et le plus lentement sous de faibles pressions. Ces expériences ont peut-être besoin d'être répétées.

63. *Pression latérale des gaz pendant l'écoulement.* Si l'on pratique une ouverture d'un à deux pouces à un réservoir d'air comprimé, et qu'on approche un disque de bois ou de métal de 7 pouces 1/2 environ de diamètre, il sera repoussé d'abord ; mais quand il sera très près de l'ouverture, il y restera attaché en s'éloignant et en s'approchant dans des limites peu étendues. Ce fait fort singulier a été observé pour la première fois par M. Griffith, directeur des forges de Fourchambault ; M. Clément en a donné l'explication suivante. La veine d'air comprimé, en passant entre le disque et la paroi du réservoir, s'épanouit, se dilate au point d'avoir une élasticité moindre que la pression de l'atmosphère ; le disque est donc poussé par l'excès de cette dernière pression sur la pression du gaz dilaté.

M. Bomby a reconnu par l'expérience, que l'adhérence du disque est d'autant plus grande, que le gaz est plus comprimé.

On peut faire l'expérience comme l'a indiqué M. Hachette. On souffle de l'air dans un tuyau conique *m n* (*fig.* 63 *bis*). On voit d'abord le disque *A B* repoussé, mais bientôt il se colle sur l'ouverture *o v*.

On voit, d'après cela, qu'il serait dangereux de donner aux plaques des soupapes de sûreté des machines à vapeur, une étendue beaucoup plus grande que celle des ouvertures contre lesquelles elles doivent être appliquées : il est vrai qu'on ne le fait pas.

Gazomètres.

64. Dans beaucoup de recherches de physique,

Il est nécessaire de pouvoir faire écouler l'air, ou tout autre gaz, avec une vitesse constante. L'appareil imaginé pour cet objet est appelé *gazomètre à niveau constant*.

1° Soit un flacon *A B* (*fig. B, pl. 5*), auquel sont adaptés deux tuyaux horizontaux *N* et *V*; ce vase est complètement plein d'eau; de plus, un tube *H O*, ouvert par les deux bouts, et destiné à transmettre la pression atmosphérique, est introduit à frottement dans le col *O* de ce flacon; on le remplit aussi de liquide. Si l'on ouvre le canal supérieur *N*, l'eau s'écoule, et l'écoulement continue jusqu'à ce que le niveau de l'eau dans l'intérieur du tube soit en *K* à la hauteur de l'orifice *N*. Puisque l'écoulement cesse, il faut qu'il y ait équilibre entre la pression atmosphérique qui s'exerce latéralement en *N* et celle qui s'exerce verticalement par le tube *O*.

2° Si lorsque cet équilibre est établi, on ouvre le canal *N'*, la pression extérieure en ce point étant supérieure à celle qui s'exerce intérieurement, l'eau monte dans le tube *H O* jusqu'en *K'*, et l'air extérieur entre pour remplir l'espace vide *C D*; ce fluide est à la pression extérieure diminuée de la petite colonne d'eau *D N'*.

3° Si l'on ouvre le canal *V*, placé au-dessous de l'ouverture inférieure du tube *O H*, on voit l'air entrer par l'extrémité *H* de ce tube, et l'eau s'écouler par le canal *V* avec une vitesse constante; le poids de la colonne d'eau *H I*, plus le poids de l'atmosphère, force l'air en *V*, et l'écoulement de l'eau a lieu en vertu de la différence de niveau *H I*, et lui est proportionnel; de sorte que la vitesse en est constante tant que l'eau est maintenue au-dessus du point *H*. Cet appareil est connu sous le nom de *flacon de Mariotte*.

Soit maintenant *A* un vase rempli d'air (*fig. C, pl. 5*); c'est cet air qu'il faut chasser par portions égales en temps égaux. A cet effet, on place au-dessus de ce vase un autre vase *B* rempli d'eau. Un tuyau dont l'orifice inférieur *Q* est tourné en haut établit la communication entre ce réservoir d'eau et le vase rempli d'air. On adapte au vase supérieur un tube *O H*, qui plonge jusqu'à une certaine profondeur *H*; l'ouverture *V*, par laquelle on remplit ce vase de liquide, est fermée. Il est visible que si l'on ouvre le robinet *R*, le liquide tombera dans le vase *A* avec une vitesse constante; car le tuyau de communication étant nécessairement rempli d'eau pendant toute l'expérience, et d'ailleurs la pression atmosphérique s'exerçant également en *H* et en *Q*, ce n'est que la hauteur *H Q* qui détermine le liquide à tomber, et tant que l'extrémité *H* du tube *O H* plongera dans le liquide, l'écoulement du gaz par un robinet *R* se fera avec une égale rapidité. Si la capacité de la partie *H V* est suffisamment grande, on pourra ainsi expulser tout le gaz du vase *A*; si elle est trop petite, ce qui est le cas ordinaire, on remplacera l'eau écoulée au fur et à mesure par le tube *O H*.

Pour recueillir le gaz, il suffira d'avoir un second gazomètre *A' B'* semblable au premier. Supposons que le vase *A'* soit plein d'eau, qu'un tube *kk'* par lequel s'écoule le gaz plonge au fond de ce second gazomètre, alors l'eau du vase *A'* se trouve dans le cas de l'expérience 1°. L'ouverture du robinet *E'* étant à la même hauteur que l'extrémité *k'* du tube, l'eau se trouve également pressée aux points *k'* et *E'*, et ne s'écoulera pas; mais un petit excès de pression en *k'*, produit par la vitesse du gaz, déterminera l'eau à sortir par le robinet *E'*. Le vase *A'* se videra ainsi, et l'eau chassée sera remplacée par le gaz. Dans l'intervalle des gazomètres, on peut faire subir toutes les épreuves que les recherches nécessitent.

Le gazomètre que nous venons de décrire suffit pour les gaz insolubles. Nous en décrirons un autre. (*Voyez* la fin de l'ouvrage, *Chaleur animale*.)

Compressibilité des Liquides.

65. Dès 1650, les membres de l'Académie de Florence cherchaient à reconnaître la compressibilité de l'eau : ayant scellé une sphère d'or remplie de ce liquide, et l'ayant soumise à une forte compression, ils virent le liquide se faire un passage à travers les pores du métal, d'où ils crurent devoir conclure que l'eau n'est pas compressible.

Tous les physiciens ne donnèrent pas leur approbation aux idées des académiciens de Florence; un grand nombre, se fondant sur la propriété qu'a l'eau de transmettre le son, admirent qu'elle jouit par cela même d'élasticité et de compressibilité.

Des essais nombreux furent faits dans divers pays; mais les procédés n'étant pas dirigés de manière à rendre les résultats indépendans de l'extension des vases, il s'ensuivit que, quoique la diminution apparente du volume liquide fût considérable, il n'était pas permis de l'attribuer, complètement du moins, à la compressibilité.

Dans le mode d'expérience de Kanton, le vase conserve son volume (*fig. 60*). Ce vase consiste en un tube de thermomètre ordinaire dans lequel est introduit le liquide : la colonne liquide est terminée par une petite colonne de mercure *m* servant d'index. Ce thermomètre ouvert, étant placé sous la machine pneumatique, on fait le vide, et l'on observe la hauteur du liquide; si on laisse rentrer subitement l'air, on voit au moment même de la rentrée de ce fluide, le liquide (l'eau, le mercure ou l'huile) baisser au-dessous de son niveau primitif d'une quantité fort sensible. Le vase, étant comprimé autant au dehors qu'au dedans, ne peut modifier la compression du liquide. Kanton obtient ainsi 0,000046 du volume primitif pour la compression de l'eau correspondante à une atmosphère. M. Œrstedt, en plaçant ce même appareil dans une éprouvette à pied remplie d'eau, et y faisant des-

cendre un piston par le moyen d'une vis, a trouvé 0,000045. M. Perkins, en Angleterre, vient aussi de faire sur le même sujet des expériences très ingénieuses, à plusieurs centaines d'atmosphères : le résultat de ses expériences est que l'eau est compressible au degré à peu près qu'avait assigné Kanton. La compressibilité des liquides est donc un fait aujourd'hui bien constaté : le mercure est beaucoup moins compressible que l'eau ; l'alcool, l'éther sulfurique et les liquides analogues le sont davantage.

L'appareil de M. Œrstedt ne nous paraît pas exacte, puisqu'il n'avertit pas si le petit index pénètre ou ne pénètre pas dans le liquide pendant l'expérience : une bulle d'air substituée à l'index de mercure ne nous paraît pas préférable. Un autre appareil, que j'ai soumis à l'Académie il y a plusieurs années, et qui est représenté dans la *fig.* 61, peut lui être substitué. Quand le tube est plongé dans la machine à compression, l'air de la partie *C D* sépare toujours le petit index *m* du liquide environnant, en sorte que la pénétration (pénétration qui a très souvent lieu dans l'appareil de M. Œrstedt) de cet index dans le liquide du tube *m n*, n'occasione aucune erreur, puisqu'on connaît toujours le volume sur lequel on opère. Le manomètre à eau doit être remplacé par une éprouvette à mercure.

J'ai fait avec cet appareil un grand nombre d'expériences; le résultat de ces expériences est *que la compressibilité des liquides est d'autant plus faible pour une pression donnée, qu'ils sont plus comprimés*. J'ai obtenu ce résultat, et je l'ai envoyé à l'Académie à une époque où tout le monde pensait que la compressibilité était proportionnelle à la pression.

M. Œrstedt admet, d'après ses expériences, que la compression de l'eau est proportionnelle à la force comprimante jusqu'à 7 atmosphères.

D'après MM. Colladon et Sturm, l'alcool, l'éther sulfurique et l'éther hydrochlorique ont une compression décroissante. Nous pensons, comme nous venons de le dire, que la diminution a lieu pour tous les liquides.

Les résultats directs des expériences doivent être corrigés, parce que, l'enveloppe du piézomètre étant comprimée au dedans et au dehors, la capacité en diminue.

Beaucoup de physiciens admettent que cette diminution se fait comme celle d'une masse solide de même matière.

M. Poisson a fait voir que dans cette hypothèse, dont il a démontré la justesse, la capacité primitive étant V, elle devient $V\left(1 - \frac{3d}{2}\right)$ sous la pression P; d étant la contraction qu'éprouverait dans sa longueur une tige de même nature que le piézomètre de l'unité de longueur, et supportant à ses bouts la même pression P, rapportée à l'unité de surface. (*Ann. de Ch. et de Phys.*, t. 38.)

Se dégage-t-il de la chaleur pendant la compression des liquides?

66. M. Œrstedt n'a pu la rendre sensible. MM. Colladon et Sturm ont fait marcher le thermomètre de Breguet de plusieurs degrés en comprimant subitement l'éther sulfurique; l'eau et l'alcool n'ont produit aucune variation de température appréciable. Comme le thermomètre de Breguet marche sous l'influence seule de la compression, on ne peut se fier aux indications de cet instrument pour la variation de température.

J'ai présenté à l'Académie un procédé propre, si je ne me trompe, à résoudre la question dont il s'agit. Ce procédé consiste 1° à laisser le corps liquide soumis à une compression déterminée prendre une température connue, en plongeant tout l'appareil dans une masse d'eau considérable; 2° à mesurer l'abaissement de température au moment où l'on ramène le liquide à la pression ordinaire. Le froid produit par l'expansion est évidemment égal à la chaleur développée par la compression.

Ce procédé me paraît surtout avoir l'avantage de permettre l'emploi d'un thermomètre ordinaire, et de conduire conséquemment à des résultats fort peu éloignés de la vérité.

Phénomènes capillaires.

67. Nous nous bornerons à faire connaître d'abord le phénomène expérimental et les principales circonstances qui y ont rapport. Ensuite nous chercherons à donner une idée des causes des phénomènes de ce genre.

C'est un fait depuis long-temps constaté, que lorsque l'on plonge un tube d'un diamètre très petit dans un liquide, le niveau dans l'intérieur est différent du niveau à l'extérieur, et quand le tube est susceptible d'être mouillé par le liquide, le niveau dans l'intérieur du tube est plus élevé; par exemple, c'est ce qui est constamment offert par l'immersion d'un tube de verre propre dans l'eau, l'alcool, etc. Si le tube n'est pas mouillé par le liquide dans lequel on le plonge, le niveau de l'intérieur est moindre que le niveau extérieur: c'est ce qui arrive, quand on plonge un tube mouillé dans le mercure, ou un tube graissé dans l'eau.

Les phénomènes capillaires sont tout-à-fait indépendans de la pression atmosphérique, puisqu'ils sont les mêmes dans le vide que dans l'air.

On comprend sous le nom de phénomènes capillaires, non seulement les phénomènes présentés par les tubes étroits, mais encore beaucoup d'au-

tres déterminés aussi par la cohésion des liquides et par l'action des solides sur leurs molécules.

Les actions qui sont la cause des phénomènes capillaires ne s'exercent qu'à des distances fort petites. Pour le démontrer d'une manière expérimentale, plongez dans l'alcool ou dans l'eau plusieurs tubes de verre égaux dans leur diamètre intérieur, mais différens par l'épaisseur de leurs parois, vous verrez que l'ascension a lieu à la même hauteur dans tous. Soufflez à une lampe d'émailleur, une boule de verre très mince, plongez-là dans un liquide, plongez-y aussi une boule d'un même diamètre, mais entièrement massive, vous enlèverez absolument la même quantité de liquide.

La cohésion des liquides peut être démontrée de plusieurs manières. Si l'on plonge un corps solide dans un liquide avec lequel il puisse être mouillé, il en retiendra une goutte quand on le retirera. Les parties de la goutte en contact immédiat avec le solide sont maintenues par l'action du solide, mais les autres ne peuvent l'être que par la cohésion du liquide.

L'effet est plus marqué quand à un des plateaux d'une balance on suspend un disque solide. On établit d'abord l'équilibre, mais si l'on amène la face inférieure du disque en contact avec le liquide, il y a adhésion et l'équilibre est rompu. Si l'on ajoute successivement des poids, on verra le disque soulever une certaine quantité de liquide, puis se détacher; mais il restera couvert d'une couche de liquide. Des disques de même diamètre, mais de différentes substances propres à être mouillées par les mêmes liquides, ont exigé les mêmes poids; ainsi c'est bien la cohésion du liquide pour lui-même qu'on mesure dans ces expériences. Un disque de verre de 12 centimètres de diamètre mouillé par l'eau exige 60 gram. pour la séparation; 30 gram. seulement quand il est mouillé par l'alcool (M. Gay-Lussac).

Pour voir comment la cohésion d'un liquide et l'action d'un solide sur les particules peuvent déterminer l'ascension ou la dépression de ce liquide, considérons un tube capillaire $a\,b$, *fig.* 61 *bis*, supposons le liquide élevé dans l'intérieur au-dessus du niveau extérieur, et de plus le tube prolongé et replié dans le liquide suivant $b\,c\,d$.

Les actions que la partie $m\,n\,b\,b'$ comprise entre le niveau $m\,n$ et l'ouverture inférieure $b\,b'$, exerce sur elle-même et éprouve de la part du tube, se détruisent et ne sauraient faire mouvoir la colonne. Mais la partie supérieure $m\,n$ de la colonne liquide $m\,n\,b\,b'$ est attirée par la paroi du tube solide de bas en haut; elle est attirée dans le même sens par la partie inférieure $b\,b'$. Si donc F est l'action du tube solide sur le liquide, l'action totale du tube sera $2\,F$. La même colonne est attirée de haut en bas par le tube prolongé au-dessous de $b\,b'$. Soit F' cette action du liquide sur lui-même, le mouvement du liquide sera déterminé par la différence $2\,F - F'$. Si $2\,F$ est plus petit que F' il y aura dépression. Si $2\,F$ est plus grand il y aura ascension; ainsi il y aura dépression ou ascension suivant que l'action du solide sur le liquide sera plus petite ou plus grande que la moitié de l'action du liquide sur lui-même.

En continuant à développer ces considérations nous arriverions à des conséquences qui seraient conformes aux résultats de l'expérience; mais nous suivrons de préférence une autre méthode plus générale.

68. Il faut d'abord concevoir qu'un liquide en repos exerce sur lui-même une action indépendante de la pesanteur terrestre, action qui tend à faire rentrer les molécules situées à la surface dans l'intérieur du liquide, et qui produirait réellement cet effet sans la résistance apportée par l'impénétrabilité. Soit en effet une molécule m, *fig.* 47 *bis*, située à une profondeur p moindre que r, rayon de la sphère d'activité du liquide. Toutes les molécules extérieures au canal $C\,D$ et situées dans la sphère dont r est le rayon, attireront m. La résultante de toutes les actions sera nulle, si p est égal à r ou est plus grand que r; elle aura la plus grande valeur si p est nul, c'est-à-dire si la molécule m est à la surface.

Si maintenant l'on représente par F l'action d'une surface plane, celle d'une surface concave sera $F - M$, celle d'une surface convexe $F + M$. En effet, supposons la colonne liquide terminée par un menisque concave $n\,A\,m\,p\,q$ (*fig.* 59). Ce menisque exercera évidemment des actions sur le filet $A\,C$, dont la résultante M sera dirigée de bas en haut; en sorte que la pression F est réduite à $F - M$. Cette pression pour une surface convexe serait $F + M$. Pour le démontrer, soit une molécule s' du menisque $n\,q\,A\,m\,p$ symétrique par rapport à une autre molécule s du menisque $n'\,q\,A\,p\,m'$. Menons l'horizontale $s'\,O$ et prenons $O\,A = O\,A'$; les actions de s' sur les molécules entre A et O détruiront les actions sur les molécules entre O et A'. Les actions de s' s'exerceront donc seulement sur les molécules placées au-dessous de A' et seront égales à celles de s sur les molécules au-dessous de A. Ainsi l'action du point s' sera donc égale à celle d'un point s symétrique de s' par rapport au plan $q\,A\,p$. On démontrerait la même identité pour toutes les molécules symétriquement placées; mais le menisque $n'\,A\,m'\,p\,q$ n'existe pas quand la surface est donc $F + M$. Maintenant l'analyse a montré que M peut être représenté par une expression de la forme $A\left(\frac{1}{r} + \frac{1}{r'}\right)$ r et r' étant les rayons de la plus petite et de la plus grande courbure au point A. Ainsi F, $F - A\left(\frac{1}{r} + \frac{1}{r'}\right)$ $F + A\left(\frac{1}{r} + \frac{1}{r'}\right)$ représentent la pression exercée par une surface plane, ou concave ou convexe.

Si $r = r'$ les deux dernières expressions devien-

dront $F - \frac{2A}{r}$ et $F + \frac{2A}{r}$, de sorte que la différence entre l'action d'une surface plane et celle d'une surface sphérique est en raison inverse du rayon de la sphère. L'expression $F - \frac{2A}{r}$ convient à l'eau, à l'alcool et aux autres liquides qui mouillent parfaitement le verre; l'expression $F + \frac{2A}{r}$ convient au mercure et aux liquides qui ne mouillent pas le verre.

En partant de ces données mathématiques il est facile de trouver la raison physique qui détermine l'ascension ou l'abaissement des liquides dans les tubes capillaires. En effet, supposons un menisque concave (*fig.* 59 *bis*). Imaginons un second tube dont les parois, infiniment minces, soient le prolongement de la surface intérieure du premier tube; supposons de plus que le tube se replie par dessous de manière à venir se terminer en B à la surface libre du liquide. Le tube $A\,C\,D\,B$ est pressé à ses deux orifices A et B par deux forces inégales; l'une en B est l'action d'un corps terminé par une surface plane, l'autre en A est celle du même corps terminée par une surface concave; or, cette dernière est plus faible, il faut donc pour l'équilibre que le liquide soit plus élevé dans le tube capillaire $A\,C$; et comme dans les tubes capillaires, le rayon du menisque est celui du tube même, il en résulte que la hauteur de la petite colonne sera en raison inverse du diamètre du tube; c'est en effet ce qui est conforme aux expériences de plusieurs physiciens, et en particulier à celles de M. Gay-Lussac, qui ont été faites avec un soin extrême.

EXEMPLES.	ÉLÉVATION EN MILLIMÈTRES.	
Diamètre des tubes en millimètres.	Eau.	Alcool.
1,294	23,163	9,182
1,904	16,686	6,084

La densité de l'alcool était de 0,820, la température des expériences était de 8° 5.

Si la surface du liquide dans le tube était convexe, les résultats seraient contraires; l'action exercée par la surface convexe étant supérieure à celle qu'exerce le plan, le liquide devrait s'abaisser au-dessous du niveau (*fig.* 59 *ter*), la hauteur de la colonne abaissée serait en raison inverse du diamètre du tube; l'expérience est encore ici tout-à-fait d'accord avec la théorie.

Pour que ces expériences présentent quelque exactitude, il faut connaître le diamètre de chaque tube. On le détermine en pesant le mercure que peut contenir une certaine longueur. Quant à la hauteur de la colonne liquide élevée ou déprimée, on la mesure par le moyen d'une lunette horizontale, mobile sur une règle verticale divisée. On vise successivement une pointe fine, en contact avec le bain extérieur et l'extrémité de la colonne. L'espace parcouru est évidemment la hauteur cherchée. On vise la partie inférieure du menisque; en sorte qu'on est obligé de faire une correction, puisqu'on néglige le menisque. Ce menisque a dans le petit tube sensiblement pour hauteur, le rayon du tube, et conséquemment pour le volume $\pi r^3 - \frac{2}{3}\pi r^3 = \pi r^2 \times \frac{r}{3}$. C'est-à-dire qu'il faut ajouter le tiers du rayon à la hauteur observée.

69. Dans l'intervalle de deux tubes concentriques ou de deux lames, dont la distance est égale à r, le liquide ne s'élève qu'à la moitié de la hauteur à laquelle il s'élève dans un tube dont le rayon est égal à r. Ce qui est d'accord avec la théorie, car l'un des rayons devenait ici $r' = \infty$, il vient $\frac{1}{r'} = 0$ et par suite $F - \frac{A}{r}$ au lieu de $F - \frac{2A}{r}$ qu'on a pour un tube capillaire.

On explique encore très bien la forme d'une hyperbole équilatère que prend l'eau entre deux lames de verre (*fig.* 47 *ter*), maintenues de manière que la ligne de jonction soit verticale, et qu'elles fassent entre elles un très petit angle, car si l'on prend l'arrête de contact $A\,E$ pour l'axe des y et pour axe des x, la ligne $A\,D$ horizontale, située dans le plan du niveau extérieur et au milieu de l'angle des deux lames, les y représenteront la hauteur du liquide, et les x les distances au sommet. Or d'après ce qui précède, on a $y : y' :: r' : r$; mais $x' : x :: r' : r$ d'où $y : y' :: x' : x$. Ainsi le produit $x \cdot y$ est constant, ce qui est le caractère de la courbe citée.

On se rend encore bien compte de beaucoup d'autres faits. Si l'on introduit par exemple dans un tube conique une goutte d'eau ou d'alcool, elle prend une forme concave à ses deux extrémités, et comme l'action d'une surface est en raison inverse du rayon, cette goutte marche vers le sommet (*fig.* 62 *ter*). De même on voit pourquoi une goutte de mercure s'éloigne du sommet.

70. L'attraction de deux corps, entre lesquels il y a exhaussement ou dépression du liquide, trouve encore son explication d'après les mêmes principes. Soient deux lames en verre, *fig.* 57 *bis*, entre lesquelles le liquide s'élève d'une quantité $U\,A$. Supposons deux filets $A\,B\,O'$, et $C\,D\,O$, l'un d'abord vertical en $A\,B$ au milieu des deux lames, et puis horizontal en $B\,O'$ et perpendiculaire à la lame de verre; l'autre hors des deux lames, vertical en $C\,D$, horizontal en $O\,D$ et perpendiculaire en O, en sorte que les points O et O' sont sur une même horizontale, perpendiculaire à la lame de verre et située au-dessous du niveau du liquide extérieur. Repré-

sentons la pression de l'atmosphère par P; la densité du liquide par d et la gravité par g, et toujours l'action d'une surface plane par F. La pression en O de O' vers O est $P+F-M+g\,d.\,AB-F$; en O de O vers O' elle est $P+F-F+g\,d\,CD$; or, ces deux pressions sont égales puisque $M=g\,d.\,AU$.

Si l'on prend deux points O et O' au-dessus du niveau extérieur, $g\,d\,A'B$ est remplacé par $g\,d\,AE$, et la pression intérieure est moindre que P; tandis que la pression extérieure est égale à P. Ainsi les deux lames sont poussées l'une vers l'autre.

On démontrerait absolument de la même manière, que deux lames (*fig.* 57 *ter*) entre lesquelles le liquide est déprimé, doivent se rapprocher.

Ainsi quand un liquide s'élève à des hauteurs différentes, des deux côtés d'une lame, au-dessus du niveau environnant, la lame doit marcher vers le côté où l'élévation est la plus grande.

De même quand il y a dépression, la lame marche vers le côté où la dépression est la plus forte; il suit de là que deux lames dont l'une est mouillée et dont l'autre n'est pas mouillée, doivent se fuir quand on les place à une petite distance l'une de l'autre (*fig.* 69 *bis*). En effet, le rapprochement de ces deux corps détermine dans le liquide compris une moindre élévation vers l'un des corps, et un moindre abaissement vers l'autre qu'à l'extérieur.

Si l'on plonge un tube dans un liquide qui s'y élève et qu'on le retire doucement, la partie inférieure de la colonne est convexe, tandis que la partie supérieure est concave. La hauteur de la colonne est à peu près le double de ce qu'elle est quand le tube plonge; elle serait exactement le double si le diamètre de la courbure inférieure était le même que celui de la courbure supérieure.

Si l'on prend un syphon dont l'une des branches ait un diamètre assez grand pour être insensible à l'action capillaire, et dont l'autre ait un diamètre beaucoup plus petit (*fig.* 69 *ter*); si l'on verse de l'eau ou de l'alcool dans la grande branche, le liquide s'élève dans la petite branche, au-dessus du niveau dans la grande branche, et se termine par une surface concave; si l'on continue à mettre du liquide lentement jusqu'à remplir toute la petite branche, il prend une forme convexe, et le niveau dans la grande branche se trouve plus haut. Ces deux expériences sont très faciles à expliquer d'après ce qui précède.

Il y a une infinité de faits dont la cause est la même que celle des phénomènes capillaires.

Par exemple, la rapide ascension de l'eau et des liquides semblables dans les corps poreux; l'action capillaire doit jouer un rôle dans la circulation de la sève dans les végétaux, etc.

Voyez la théorie de Laplace, supplément à la mécanique céleste, et une théorie plus récente de M. Poisson.

Phénomènes dépendans de l'action moléculaire dans les corps solides.

71. *De l'Élasticité.* Il a été démontré précédemment que les molécules des corps sont séparées par des intervalles; ces intervalles peuvent être augmentés ou diminués par l'action de forces extérieures; quand l'action de ces forces a cessé, les molécules, si le corps est *élastique*, reviennent, par une suite d'oscillations isochrones, à leur position d'équilibre. Chaque molécule oscille ici comme un pendule qu'on a un peu dérangé de la verticale. C'est cette tendance des molécules à reprendre leurs positions d'équilibre qui constitue l'*élasticité*.

Tous les corps solides ne sont pas élastiques au même degré. Aucun ne possède une *élasticité absolue;* quand les molécules même du corps le plus élastique ont été rapprochées ou écartées au delà d'une *certaine limite*, elles ne reprennent pas leurs positions primitives. Ainsi l'or, l'argent, etc., conservent l'empreinte des matrices dans lesquelles ils ont été fortement comprimés.

L'élasticité peut être modifiée par diverses circonstances. L'acier, le verre, augmentent d'élasticité par la trempe, c'est-à-dire par un abaissement brusque de température. L'alliage des cymbales et des tam-tams acquiert au contraire une élasticité considérable par un refroidissement lent. Certains métaux prennent plus d'élasticité par le choc, la pression, etc. L'explication de ces diverses modifications dans l'état moléculaire n'est pas bien connue. Nous ne nous y arrêterons pas.

Nous rapporterons maintenant les principaux résultats auxquels ont conduit le calcul et l'expérience sur ce sujet.

72. *Traction.* Si un prisme solide est soumis à chacune de ses bases à une traction F de kil. par chaque millim. carré, et à la pression atmosphérique P sur ses autres faces, le calcul donne pour la dilatation cubique D, $D=\frac{1}{E}.\frac{F-3P}{5}$ et pour la dilatation en longueur $D'=\frac{1}{E}.\frac{2F-P}{5}$, E étant le coefficient de l'élasticité. Le calcul donne le moyen de trouver la valeur de ce coefficient E, quand on connaît l'allongement d d'un prisme sous l'unité de longueur. On a la relation $E=\frac{2F}{5d}+\frac{P}{5}$.

Ces diverses formules peuvent être simplifiées; si l'on considère que F est toujours beaucoup plus considérable que P, qui est égal à $0,^{k}01$, et que conséquemment P est négligeable par rapport à F, on aura donc $D=\frac{1}{E}\frac{F}{5}$; $D'=\frac{1}{E}.\frac{2F}{5}$; $E=\frac{2F}{5d}$ (a). Les quantités D, D' sont, comme on voit, *proportionnelles* à la *traction exercée*. Le coefficient E entre dans les expressions analytiques des mou-

vemens intérieurs d'un corps solide; il varie nécessairement d'un corps à l'autre. Les formules (*a*) conviendraient également au cas où la force F se changerait en une pression. Les allongemens que subit un fil métallique, vertical, soumis à divers poids, sont proportionnels à ces poids. (S'Gravesande.)

Le coefficient E n'a pas encore été déterminé avec une grande précision pour les différens corps, parce que les changemens correspondans à des compressions données, n'ont pas encore été assez exactement estimés.

En introduisant dans la formule l'allongement correspondant à une traction donnée, on trouve $E=8000$ pour le fer, $E=3636$ pour le verre, 2510 pour le laiton et 202 pour le plomb.

L'analyse indique qu'un corps homogène soumis à une pression constante F sur toute sa surface, a pour *contraction cubique* $\frac{3F}{5E}$. Si l'on admet les valeurs précédentes, on trouvera, en supposant F égal à 1 k par millimètre carré, $\frac{1}{13333}$ pour la compressibilité du fer, $\frac{1}{6060}$ pour le verre, $\frac{1}{4183}$ pour le laiton et $\frac{1}{337}$ pour le plomb.

D'après l'analyse de M. Poisson, a étant l'allongement d'un cylindre d'une longueur égale à l'unité, la diminution du diamètre sera $\frac{a}{4}$, en sorte que le volume primitif étant V, il deviendra $V(1+\frac{a}{2})$. On néglige les puissances de a supérieures à la première (*Ann. de Chim. et de Phys.*, t. 36, p. 384). Ce résultat analytique s'accorde avec une expérience de M. Cagnard Latour.

72. *Ténacité*. La ténacité d'un corps est la résistance à la rupture. Soit F le nombre de kilogrammes nécessaires pour produire la rupture par la traction, S l'aire de la section perpendiculaire au sens de la traction, et exprimée en millimètres, $\frac{F}{S}$ sera ce qu'on prend pour la mesure de la ténacité. C'est ainsi qu'on a trouvé les résultats suivans pour la ténacité moyenne :

Fil de fer.	65 kil. sur 1mm carré.
Fil recuit.	40
Fer en barre. . . .	45
Acier.	36
Fonte.	14
Laiton.	60
Idem recuit	31
Cuivre rouge laminé .	21 kil. sur 1mm carré.
Plomb	1,35
Verges en verre. . .	2,50

73. *Résistance des Vases*. Prenons un cas simple, un tuyau cylindrique. C'est le cas qui se représente le plus souvent dans la pratique. Choisissons même un seul anneau perpendiculaire à la longueur du tuyau, les forces normales ab, cd, ef, (*fig.* 31 *bis*), exercées du dedans en dehors tendront à étendre et à rompre l'anneau. Elles se transformeront donc en des forces tangentielles pb et $p'b$. On démontre en mécanique que $q=pr$; q étant la force tangentielle, p la force normale rapportée au millimètre carré, et r, le rayon de l'anneau, évalué aussi en millimètres.

Il est facile de voir dans quel rapport doit varier l'épaisseur à donner à différens tuyaux d'une même substance et libres par les deux bouts.

Soit E l'épaisseur du tuyau pour lequel nous avons la relation $q=pr$; T la ténacité de la substance pour 1 millimètre carré; la plus grande résistance possible du tuyau fera

$ET=q$, d'où $ET=pr$, d'où $E=\frac{pr}{T}$.

Cette relation montre que l'épaisseur d'un tuyau doit être en raison des pressions normales qu'il supporte et du rayon, et en raison inverse de la ténacité.

Si l'on introduit dans cette formule les nombres donnés plus haut pour la ténacité, on trouvera qu'un tuyau en plomb de 25mm de rayon et de 5mm d'épaisseur peut supporter 27 atmosphères; un tuyau en cuivre en supporterait 420 et un tuyau en fer 1300.

Dans un cylindre fermé à ses deux bouts, la traction dans la longueur serait réduite à $\frac{pr}{2}$. C'est la même force qui s'exerce sur chaque unité de surface d'une sphère creuse. (Voyez *l'ouvrage de M. Navier pour de plus longs développemens, et pour la théorie complète de la résistance des vases*).

74. *De l'Élasticité de torsion*. Les fils tordus présentent plusieurs résultats importans :

1° Les oscillations d'un fil pour revenir à sa position d'équilibre sont *isochrones*. Pour constater cette loi, on attache le fil à une pince et on le tient vertical par le moyen d'un poids cylindrique, dont l'axe se confond avec l'axe du fil; le poids est assez fort pour tendre le fil et non pour l'étirer.

On démontre en mécanique que l'isochronisme des oscillations ayant lieu, la force de torsion doit être *proportionnelle à l'angle* de torsion : c'est sur cette dernière propriété qu'est fondée la balance de torsion ou de Coulomb (voyez *Électricité*);

2° *Les temps* des oscillations sont proportionnels *à la racine carrée des poids* qui tendent le fil;

3° *Les temps* des oscillations sont comme *la ra-*

cine carrée des longueurs, la tension restant la même ;

4° *Les temps* des oscillations sont en raison *inverse des carrés des diamètres des fils.*

Il est bien entendu que ces lois ne sont vraies que dans les limites dans lesquelles la force de torsion n'est pas altérée.

Nous avons déjà cité une application importante des lois précédentes. Nous y reviendrons quand nous traiterons de l'électricité. Nous donnerons maintenant quelques détails sur l'expérience non moins importante par laquelle Cavendish a cherché la densité moyenne de la terre (page 20).

Supposons qu'on ait corrigé la durée d'une oscillation du levier de l'effet dû à la force de torsion. Soit t le temps d'une oscillation du levier. En substituant cette valeur dans la formule $t = \pi\sqrt{\frac{l}{g}}$ (n° 24), on avait la longueur l du pendule qui, soumis à la pesanteur, aurait été isochrone avec le levier oscillant sous l'influence seule de la masse de plomb, ce qui conduirait à la relation $l : l' :: g : g'$ (n° 25). Mais la gravité g est égale à $\frac{F v d}{r^2} = \frac{4}{3}\pi r D$; F étant l'intensité de la pesanteur pour l'unité de masse et pour l'unité de distance, r le rayon, v le volume et D la densité moyenne de la terre. Maintenant l'action de chaque masse de plomb sera aussi $\frac{4}{3} \cdot \frac{F \pi r'^3 d'}{d^2}$; r' étant le rayon et d' la densité de la boule, et d la distance au centre de cette boule. Ainsi la proportion précédente était ramenée à $l : l' :: r D : \frac{r' d'}{d^2}$; d'où Cavendish a tiré la valeur de D déjà rapportée.

Voici une troisième application : on trouve, par l'examen des formules établies sur la torsion des fils, que les coefficiens d'élasticité sont proportionnels aux carrés des nombres d'oscillations faites dans le même temps par des fils de même longueur et de même diamètre. On a donc là un moyen très précis de déterminer le coefficient E dont il a été question plus haut.

75. *Choc des corps.* Pour plus de simplicité, nous prendrons les deux cas extrêmes, celui des corps non élastiques ou ductiles, et celui des corps parfaitement élastiques.

76. *Choc des corps ductiles.* Il se présente d'abord plusieurs cas, dont l'explication est évidente d'elle-même. Si deux masses égales, animées de vitesses égales, dirigées en sens contraire, se rencontrent, elles doivent détruire réciproquement leur vitesse. Il en est encore ainsi de deux masses inégales, ayant des quantités égales de mouvement.

Si les quantités de mouvement sont inégales, la plus grande l'emporte nécessairement. Dans ce cas, les masses étant m et m', les vitesses v et v', et de sens contraire, la vitesse commune sera $\frac{m v - m' v'}{m + m'}$ (a), c'est-à-dire la différence des quantités de mouvement divisée par la somme des masses. La vitesse commune sera $\frac{m v + m' v'}{m + m'}$ pour le cas des vitesses dirigées dans le même sens.

Il ressort de ces formules quelques conséquences auxquelles le seul raisonnement conduirait. Si $v' = o$ on a $\frac{m v}{m + m'}$; c'est-à-dire qu'il faut diviser la quantité de mouvement du corps choquant, pour avoir la vitesse commune. Si m' est très grand par rapport à m et que $v = o$, la vitesse sera presque nulle. C'est le cas d'un mobile rencontrant une montagne, la terre, etc.

On vérifie les formules précédentes avec une machine très simple (*fig.* 19 *bis*). On a deux boules d'argile, suspendues chacune à un fil. On partage l'arc $A\ O$ en parties inégales, et l'on écrit sur chaque point la vitesse qu'aurait la boule en arrivant au point O; si par exemple $m = 9$; $m' = 3$; $v = 6$ et $v' = 2$; la vitesse commune serait $\frac{60}{12} = 5$. Si les corps allaient en sens contraire, on aurait $\frac{54 - 6}{12}$ ou 4, on trouverait dans le premier cas que les corps s'élèveraient au nombre 5, et dans le second au nombre 4.

Si un corps non élastique frappe obliquement un plan résistant, il glissera sur ce plan, puis tombera. En effet, on peut décomposer la force dont il est animé en deux autres, l'une perpendiculaire, l'autre parallèle au plan ; la première sera détruite par la résistance du plan ; la seconde fera glisser le corps.

Si les centres de gravité des deux corps ne sont pas sur une même ligne droite, la question devient alors un problème de mécanique que nous ne pouvons traiter ici.

77. *Choc des corps élastiques.* Un corps élastique rencontrant un plan fixe infiniment résistant, se comprime jusqu'à ce qu'il ait perdu sa vitesse. Ensuite son élasticité lui rend et sa forme et sa vitesse initiale, mais cette dernière en sens opposé.

Si deux sphères élastiques, dont les centres sont situés sur une même ligne droite, se rencontrent, chaque sphère prend la vitesse qu'elle aurait si ellé était sans élasticité, moins ce qu'elle aurait perdu, ou plus ce qu'elle aurait gagné. En sorte que l'effet de l'élasticité est de doubler les pertes et les gains de vitesse.

C'est ce qu'il est facile de comprendre, en remarquant qu'au moment où les deux corps cessent de se comprimer et où ils ont la vitesse qu'ils au-

raient s'ils étaient sans élasticité, celle-ci donne à chacun d'eux une vitesse proportionnelle à la compression qu'il a subie. Ainsi, supposons que les deux corps aillent dans le même sens, que X et X' soient les vitesses cherchées, U la vitesse commune, V et V' les vitesses primitives, m et m' les masses. On aura $X = U - (V - U)$ et $X' = U + (U - V')$ ou $X = \frac{(m - m')V + 2m'V}{m + m'}$ $X = \frac{(m' - m)V' + 2mV}{m + m'}$.

Si les masses m et m' sont égales, on trouve $X = V'$ et $X' = V$. Ainsi dans le choc de deux billes égales, il y a échange de vitesse. Conséquemment si la bille choquée était en repos, elle prendrait la vitesse de la bille choquante, et celle-ci resterait en repos.

On peut vérifier ces formules avec un appareil semblable à celui qui a servi pour les corps ductiles. Il suffit de remplacer les boules d'argiles par des boules d'ivoire. Si les centres de gravité ne sont pas sur une même ligne droite, le problème est encore plus compliqué que pour les corps ductiles.

Un corps élastique se réfléchit sur un plan fixe et infiniment résistant, en faisant l'angle de réflexion égal à l'angle d'incidence.

Dans les formules ci-dessus, nous supposons qu'au moment où les sphères se séparent, elles ont repris leur forme primitive, et qu'elles n'ont pas conservé de vibration.

Ces principes, appliqués au choc des billes égales et parfaitement élastiques, telles qu'on les emploie dans le jeu de billard, donnent complètement les vitesses estimées dans la direction de la normale au point de contact après le choc. On trouve en effet, en les appliquant, qu'il y a échange de vitesse normale entre la bille choquée et la bille choquante. Quant au choc contre la bande, comme celle-ci ne peut être assimilée à un plan très résistant, la composante normale, à la bande de la vitesse que la bille prend après le choc, n'est pas égale à la composante normale avant le choc; en sorte que l'angle de réflexion ne serait pas égal à l'angle d'incidence, lors même qu'on mettrait de côté l'influence du frottement de la bille contre la bande et le mouvement de rotation qu'a cette bille au moment du choc. (*Voyez* l'ouvrage de M. Coriolis sur la *Théorie des effets du billard.*)

78. La communication du mouvement par le choc n'est jamais instantanée; elle dure pendant le temps, très court à la vérité, pendant lequel s'accomplit la compression. On se fonde sur cette durée pour donner l'explication de quelques faits très curieux.

Une balle perce un carreau de verre, en y produisant seulement une ouverture égale à son diamètre; un boulet de canon, lancé à peu de distance d'un vaisseau, ne produit qu'une ouverture sans déchirure. Un boulet emporte, sans renverser le soldat, le bout d'un fusil qu'il porte. Dans ces différens cas, le mouvement étant très rapide, le mobile a déplacé les parties qui se trouvent sur son passage, avant que le mouvement ait pu se communiquer aux parties voisines. Si au contraire le mouvement était moins rapide le carreau serait brisé, le vaisseau déchiré, le soldat renversé.

79. On a donné le nom de *pendule balistique* à un pendule destiné à mesurer la vitesse des projectiles. Ce pendule se compose d'une grande masse de bois suspendue à une barre de fer. Le projectile pénètre dans cette masse, et lui fait subir un certain déplacement d'après lequel on estime la vitesse, laquelle, multipliée par la somme des masses, donne la quantité totale de mouvement, qui, divisée par la masse des mobiles, en donne la vitesse.

L'explication du *recul* des armes à feu se trouve naturellement placée ici. La culasse et le mobile sont repoussés avec la même force par l'explosion de la poudre; mais le mobile, ayant peu de masse, est entraîné, tandis que l'arme n'éprouve qu'un petit déplacement. Les parois du canon résistent.

La résistance du milieu rentre encore dans le sujet de la communication du mouvement. On admet que *la résistance des milieux est proportionnelle au carré de la vitesse du corps qui le traverse.*

80. On donne le nom de ductilité à la propriété qu'ont certains métaux d'être réduits en fils par leur passage à la filière. On appelle malléabilité la propriété d'être réduits en lames minces par l'action du marteau ou du laminoir. L'ordre des métaux par rapport à la ductilité est platine, argent, fer, cuivre, or, zinc, étain, plomb. L'ordre de la malléabilité estimée au laminoir est or, argent, cuivre, étain, plomb, zinc, platine, fer. Les corps diffèrent aussi par la dureté, c'est-à-dire par la propriété, lorsqu'ils sont taillés en pointes, de rayer des surfaces moins dures. Dans l'état actuel de la physique, il n'y a pas de moyen de donner une mesure exacte de la dureté, et d'autres propriétés analogues des corps solides.

81. *Frottement.* L'explication des divers faits présentés par le frottement n'a pas encore été donnée. Le frottement est moindre entre des surfaces polies ou enduites de matières grasses. L'adhérence des corps de même nature surpasse celle des corps de matière différente; elle croît avec la durée du contact pour le bois, etc.; cette durée ne paraît pas avoir d'influence sur l'adhérence des métaux polis.

Le frottement pour des surfaces hétérogènes croît sensiblement en progression arithmétique, quand la vitesse croît en progression géométrique.

Il est proportionnel à la pression et ne dépend nullement de l'étendue des surfaces en contact. Par exemple, un polyèdre à faces inégales se mettra en mouvement sur un plan incliné sous la même inclinaison, quelle que soit la face sur laquelle il pose.

On appelle frottement de première espèce celui

d'un corps qui glisse sur un autre, et frottement de deuxième espèce, celui d'un corps qui roule; toutes choses égales d'ailleurs, l'adhérence est beaucoup plus petite dans le second cas.

L'appareil le plus simple pour les recherches sur le frottement consiste en un plan incliné, mobile autour d'une charnière; il existe toujours une inclinaison pour laquelle la composante de la pesanteur parallèle au plan fait équilibre au frottement.

De quelques Instrumens communément employés.

82. Les instrumens le plus fréquemment employés dans les recherches scientifiques sont le thermomètre, le baromètre, l'hygromètre, le microscope, la machine pneumatique, la balance, le vernier, la vis, le comparateur et le sphéromètre.

Il a été question de la balance n° 33; nous nous occuperons plus tard des cinq premiers instrumens; nous ne parlerons ici que du vernier, de la vis, du comparateur et du sphéromètre, lesquels sont spécialement consacrés à mesurer l'étendue.

La règle et le compas sont d'un usage trop constant et trop général pour qu'il ne soit pas superflu de les considérer ici.

Le *vernier* a reçu son nom du géomètre français qui l'a imaginé. Cet instrument fournit le moyen d'avoir des parties d'une extrême petitesse. Soit une règle AB (*fig.* 76 bis) divisée en dix parties; soit une ligne CD dont on désire connaître la longueur : on la posera sur la règle dont elle couvrira un certain nombre de divisions, plus une fraction de division gf. C'est cette fraction qu'il s'agit d'évaluer d'une manière rigoureuse. A cet effet, on construit une seconde règle divisée en parties plus petites que celles de la première : supposons que dix de ces parties en recouvrent neuf de la première (*fig.* 77). Ces deux règles étant superposées et les extrémités A et H coïncidant, la première division de HK sera en arrière de la première division de BA de $1/10\ D$ (D étant une division de AB), la seconde de $2/10\ D$, et ainsi de suite. Fait-on glisser maintenant la règle HK (*fig.* 78) de manière que la première division de cette dernière corresponde à la première de AB, il est visible que la dernière de HK sera avancée en même temps de $1/10\ D$; cette dernière division avancera de même de $2/10\ D$, si l'on applique la seconde division de HK sur la seconde de AB. D'après cela, si le point D de la ligne CD tombait en K, on aurait la valeur de la fraction gf, qui serait égale à $2/10$ de division. Si le point D tombait entre deux dixièmes, on évaluerait approximativement la fraction. On aurait une exactitude plus grande si le vernier embrassait un plus grand nombre de divisions de la règle AB. Il faut cependant dire qu'il y a une limite à cette division. Cette limite naît de la difficulté de bien observer la coïncidence des parties et de tracer des lignes assez fines.

On applique avec la même facilité le vernier aux divisions circulaires. Dans beaucoup de circonstances le vernier glisse à frottement le long de la règle (baromètre); quelquefois on le fixe à une vis, afin que le mouvement en soit lent et gradué.

De la Vis.

83. On emploie souvent la vis pour diviser une longueur donnée en parties égales, pour apprécier de très petites distances, etc.; on fait, par exemple, usage de cet instrument pour partager les grandes divisions des tubes thermométriques en sous-divisions d'égale capacité; on suppose alors le diamètre le même dans toute la longueur de chaque grande division, qui peut contenir dix degrés ou plus. Il est indispensable que des filets de la vis destinée à cet usage soient espacés avec une régularité parfaite. On peut juger si la vis remplit cette condition; pour cela on trace sur la tête CD (*fig.* 73. une division circulaire, et l'on en rapporte la marche à un index fixe AB. Ainsi, supposons la division circulaire de 400 parties; en la tournant d'une seule, on fera avancer la vis de $1/400$ du pas, ce sera de $1/400$ de millimètre si le pas est d'un millimètre. Une vis bien travaillée marchera toujours de la même quantité pour le même nombre de tours.

Du Sphéromètre.

84. On a employé la vis, disposée d'une certaine manière, à mesurer la courbure des verres sphériques et l'épaisseur des lames; on a donné à ce nouvel instrument le nom de sphéromètre. La *fig.* 80 le représente : on voit que c'est la vis de la *fig.* 73, placée dans une position verticale. Il est composé de trois branches d'acier horizontales, aux extrémités desquelles se trouvent trois tiges d'acier verticales et amincies en pointes aaa: au centre est la vis. Celle-ci et les trois pointes aaa reposent sur un plan bien uni.

On reconnaît avec une grande facilité, par le moyen du sphéromètre, si la surface d'un verre est plane. On dispose le tout de manière que, la pointe de la vis c touchant la surface du verre, les trois pieds soient aussi en contact avec le plan de verre sur lequel tout l'appareil repose. Si on le fait glisser d'une petite quantité, la plus légère inégalité dans la surface sera aperçue par la moindre stabilité de l'appareil et par la nature du son qu'il rendra. Ce son sera très différent de ce qu'il est quand les quatre points aaa et c reposent sur le verre. Veut-on juger de l'égalité de courbure d'une lentille ? On posera les points aaa et la vis c sur la lentille, de manière que cette dernière soit au cen-

tre : la rotation de l'instrument rendra sensible le moindre changement dans la courbure, par les mêmes indices que ci-dessus. Quant à l'épaisseur d'une lame quelconque, elle peut être mesurée par le mouvement de la vis *C D* ; pour cela on amène la pointe *c* en contact avec le plan de verre ; on note le nombre de tours que doit faire le cercle divisé *A B* pour que la lame puisse être placée entre le plan de verre et la pointe *c*. Si l'on avait à craindre l'altération de cette lame, on la placerait sous une autre lame à faces tout-à-fait parallèles. L'instrument, tel que nous venons d'en faire la description, a été imaginé par M. Cauchois : un instrument d'une forme différente et d'une destination analogue, connu sous le nom de sphéromètre, avait déjà été décrit par M. L. R. D. (*Journ. de Phys.*, 1776). L'auteur se proposait surtout de mesurer les rayons de courbure des verres concaves et convexes. Ce sphéromètre a été employé à cet usage par Rochon et d'autres physiciens du temps.

L'application du sphéromètre à ce dernier usage repose sur une proportion connue de géométrie : *O P* (*fig.* 70 *bis.*) est moyen proportionnel entre *A O* et la partie *O B*. Tout consiste donc à mesurer le diamètre *C D* et l'épaisseur *E F* d'un verre lenticulaire (*fig.* 71). Le premier est double de *O P* et le second de *A O*. Par la proportion ci-dessus on aura *O B* et par suite *A B* double du rayon de courbure du verre.

Du Comparateur.

85. Le comparateur sert à constater l'égalité de deux longueurs, ou à en apprécier la différence si elles sont inégales. Cet instrument est composé d'une règle métallique *A B*, forte et droite (*fig.* 82). A l'extrémité *A* est un talon qui sert à appuyer les objets que l'on compare ; un châssis mobile parcourt toute la longueur de la règle ; on le fixe au point convenable par le moyen de vis. Ce châssis porte un tourillon *a*, autour duquel tourne un levier coudé *a b c*, dont les deux branches sont très inégales. Le mouvement du bras *a c* est indiqué par un vernier. S'agit-il de comparer deux barres ? on en placera une sur le comparateur, de manière qu'elle soit appuyée contre le talon *A*, et l'on amènera le bras coudé *b* en contact avec l'autre extrémité ; on fixera le châssis et l'on notera le point de la division circulaire où s'arrêtera l'extrémité *c*. On enlèvera la barre et on y substituera l'autre, sans toucher au châssis ; un ressort *F* poussera le bras *b*, et le fera appliquer exactement contre la barre. Si l'extrémité *c* correspond à la même division, les deux barres sont égales, dans le cas contraire, elles sont inégales, et l'on peut avoir la valeur de la différence. Par exemple, si l'extrémité *c* a marché de trois lignes, et que le bras *a c* soit dix fois plus grand que le bras *a b*, la différence des deux barres sera 3/10 de ligne.

DE LA CHALEUR.

EXPLICATION DÉTAILLÉE DE LA CONSTRUCTION DU THERMOMÈTRE.

86. Quand on veut diviser un corps solide en plusieurs parties, on éprouve de la résistance; cette résistance, variable pour chaque corps, et produite par la cohésion, serait sans doute beaucoup plus grande si les molécules étaient sollicitées par cette seule force ; mais la chaleur, répandue dans l'intérieur de tous les corps, tend sans cesse à écarter les parties qui les constituent, et balance ainsi plus ou moins les effets de l'attraction moléculaire. A la cause inconnue des phénomènes de la chaleur on a donné long-temps le nom de feu ou de matière de la chaleur. Lors de la réformation du langage chimique, on l'a appelée *calorique :* l'existence du calorique comme matière particulière est bien incertaine.

Des physiciens d'un mérite éminent ont même admis que la chaleur n'est que l'effet d'un mouvement intérieur qui détermine le rapprochement ou l'écartement des molécules selon les circonstances. (Voyez *Théorie des ondulations.*)

Nous adopterons le mot commun de chaleur, dénomination qui a l'avantage de ne supposer ni l'une ni l'autre hypothèse. La chaleur pénètre tous les corps et en augmente en général le volume à mesure qu'elle s'y accumule. Introduite dans les corps, elle s'en échappe continuellement sous forme de rayons. Si deux corps sont en présence l'un de l'autre, il s'établit entre eux des échanges de chaleur qui amènent bientôt l'égalité ou l'équilibre de température. La *température* d'un corps dépend de la tendance de la chaleur contenue dans ce corps à s'en échapper, et la température est plus ou moins élevée, selon que cette tendance est plus ou moins grande.

87. On a imaginé des instrumens appelés *thermomètres,* à l'aide desquels on peut mesurer la température des corps. L'invention du thermomètre date de la fin du seizième siècle; les physiciens ne sont pas d'accord sur l'auteur de cette invention : les uns pensent que c'est Galilée, d'autres prétendent que c'est Drebbel de Nord-Hollande. Newton, dès 1701, avait senti la nécessité d'un intervalle constant; il prit l'eau bouillante et la glace fondante pour les deux points extrêmes de son thermomètre ; il fit usage d'huile de lin. Il paraît qu'Ammontons, vers la même époque, prenait aussi le point de l'eau bouillante pour terme fixe.

Réaumur donna son thermomètre en 1730. Il se servit d'un alcool qu'on pouvait se procurer au même degré de pureté dans tous les temps et dans tous les pays, et qui depuis la congélation de l'eau jusqu'au point où il était le plus échauffé sans bouillir, se dilatait de 80/1000 de son volume à zéro. De plus, chaque degré de son échelle était la millième partie de la capacité de la boule et du tube jusqu'à zéro. Réaumur employait pour la graduation de son thermomètre le procédé qu'on emploie encore aujourd'hui pour diviser les tubes destinés à la mesure des gaz, et qui consiste à les remplir successivement avec des quantités égales de mercure. Il a bien connu les conditions auxquelles doit satisfaire un bon thermomètre; mais la congélation artificielle de l'eau, et la plus haute température que pouvait atteindre son alcool sans bouillir, ne sont pas aussi fixes qu'il le pensait. Deluc a beaucoup contribué à faire substituer le mercure à l'alcool et à prendre la glace fondante et l'eau bouillante pour les deux points fixes.

88. Nous allons indiquer actuellement la construction du thermomètre telle qu'on l'exécute aujourd'hui. Il faut d'abord faire choix d'un tube dont le diamètre intérieur soit le même dans toute sa longueur; à cet effet on fait couler une petite colonne de mercure dans le tube; si ce métal occupe le même intervalle, dans un point quelconque, le tube sera parfaitement cylindrique. Mais il est assez rare de trouver des tubes qui représentent cette égalité dans une longueur même d'un demi-pied. Il est donc utile de pouvoir diviser un tube quelconque en parties d'égale capacité; on y parvient en introduisant dans ce tube une colonne de mercure *m b* qui en remplit plus que la moitié; on la fixe d'abord à une extrémité. Si l'on porte ensuite en *n* l'extrémité qui était en *b* (*fig.* 87), celle qui était en *m* va se retrouver un peu au delà du milieu en *a*. Il est évident que les deux portions *m a* et *n b*

sont égales en capacité, et qu'on trouvera le véritable milieu du tube, si l'on divise la portion *a.b* en deux parties d'égale capacité; mais cet intervalle est assez petit pour qu'on admette, sans erreur sensible, l'égalité du diamètre dans sa longueur. Il suffira donc de prendre le milieu de la ligne *a b*; la section qui partage la partie *m n* du tube donné en deux portions égales, tombera sur le point ainsi déterminé. On pourra en agir de même à l'égard de chaque moitié, et ainsi de suite; de sorte que le tube entier sera exactement divisé en parties d'égale capacité. Ce procédé ingénieux a été proposé par M. Gay-Lussac.

Me sera-t-il permis de rapporter un procédé que j'ai souvent employé? Ce procédé consiste à introduire dans le tube qu'on veut graduer une colonne de mercure égale à peu près au dixième de sa longueur. Soit *a b* (*fig.* 88) cette colonne. On marque avec un diamant les points *a* et *b*; on porte ensuite l'extrémité *a* en *b* et l'extrémité *b* en *d*. Il est visible que les deux parties *ab* et *bd* sont égales en capacité; il en sera de même de toutes les autres parties ainsi obtenues. Le reste s'achève comme précédemment. Ce procédé n'est pas plus exact que celui de M. Gay-Lussac; mais il est peut-être d'une exécution plus facile. Des thermomètres que j'ai ainsi construits ont été d'accord entre eux.

On soude à une des extrémités du tube gradué une boule ou un cylindre *R*; et à l'autre, un tube plus large et plus long *AB* (*fig.* 91). On chauffe d'abord le tube dans toute sa longueur, afin de le sécher : on verse ensuite du mercure bien sec par le grand tube; l'air se contracte par le refroidissement, et le mercure tombe dans le réservoir; l'on porte ensuite le mercure à l'ébullition, jusqu'à ce qu'on ait chassé complètement l'air et l'humidité qui restent adhérens aux parois intérieures du tube. Un fourneau ordinaire, dont les parois sont percées de trous, convient le mieux pour cette opération. Quand il ne reste plus d'air dans le mercure, on laisse refroidir l'appareil; puis on ôte tout le mercure du réservoir supérieur; on fait sortir une partie du mercure de la tige, on laisse un petit réservoir dans la partie supérieure qu'on ferme à la lampe (*fig.* 92). Ce réservoir est destiné à recevoir le mercure dans le cas où l'on porterait l'instrument à une température plus élevée que celle qu'admet la tige.

Si la colonne de mercure se divisait par suite de l'introduction d'une bulle d'air, on ferait tourner le thermomètre avec force, en l'attachant par la partie supérieure à une ficelle, et bientôt l'air rentrerait dans le petit réservoir *B*. Il reste à prendre les points fixes.

Le zéro s'obtient de la manière suivante : On plonge dans la neige ou dans la glace pilée toute la partie du thermomètre qui contient du mercure; le lieu de l'observation doit avoir une température supérieure à zéro, afin de commencer la fusion de la neige ou de la glace, et de donner conséquemment une température constante; le mercure d'un thermomètre à réservoir ordinaire cesse de descendre au bout d'une demi-heure; on note le point où il s'arrête.

Le second point fixe est celui de l'eau bouillante; un thermomètre qu'on plonge dans cette dernière se maintient au même point pendant tout le temps de l'ébullition. Ce fait est aussi général que celui de la fusion; mais il est bon d'indiquer plusieurs précautions propres à assurer l'exacte détermination de ce point. L'eau doit être parfaitement pure; de plus, il faut que le vase dans lequel on opère soit en métal; s'il était en verre ou en porcelaine, la température de l'eau bouillante pourrait éprouver des variations d'un à deux degrés et plus. La couche en ébullition ne doit pas dépasser deux pouces, afin que la vapeur qui se forme dans le fond du vase n'ait qu'une faible colonne à soulever. On ne peut se dispenser de consulter la hauteur du baromètre, car l'eau n'entre en ébullition à 100° qu'autant que le mercure de cet instrument se tient à $0^m,76$. Quand il est au-dessous ou au-dessus de $0^m,76$, la température est inférieure ou supérieure à 100°; mais, comme on connaît la variation de température correspondante à un changement donné dans la hauteur barométrique, on peut toujours ramener, par le calcul, le point de l'eau bouillante à la pression $0^m,76$ (1).

Pour faire cette expérience commodément, on construit un vase en fer blanc ou mieux en cuivre (*fig.* 84); la partie inférieure *A B*, qui sert de réservoir à ce vase, est percée et renfermée dans un autre vase *C D*, d'un diamètre un peu plus grand. De cette manière on connaît le niveau de l'eau; et ce liquide, se trouvant en communication directe avec l'atmosphère, ne peut jamais prendre que la température de son ébullition à l'air libre. A cette première partie est adapté un tuyau *H K*, formé de plusieurs pièces emboîtées les unes dans les autres, et qu'on sépare à volonté; le thermomètre est introduit par l'ouverture *O*. La disposition seule de ce petit appareil montre que le réservoir et la colonne de mercure sont entièrement plongés dans la vapeur, dont l'excès s'échappe par les ouvertures latérales *m* et *n*. On fait monter ou descendre le tube, de manière que le point où s'arrête le mercure ne dépasse que d'une petite quantité le bouchon dans lequel est retenu le thermomètre.

Il est rare que les deux points fixes correspondent à des divisions entières; il est encore plus rare que l'intervalle entre ces deux points soit égal à 100 divisions; en sorte qu'on est obligé de faire une table pour chaque thermomètre ainsi construit; supposons, par exemple, que le mercure s'arrête à 7,5 divisions dans la glace et à 147,8 dans l'eau bouillante sous la pression $0^m,76$. L'intervalle 147,8—7,5 correspondra à 100 degrés. Conséquem-

(1) D'après le révérend P. Wollaston, 27^{mm} de pression correspondent à un degré centigrade.

ment chaque division de cet instrument vaudra 0°,71. Si la pression avait été au-dessous ou au-dessus de 0m,76, l'intervalle entre la glace et l'eau bouillante aurait été plus grand ou plus petit que 100°, par exemple pour une pression 0m,75, l'intervalle serait de 99°,63, car un abaissement de 10mm dans la pression correspond à un abaissement de 0°,37 dans la température de l'ébullition (p. 46). C'est 99°,63 qu'on diviserait par 147,8 — 7,5 pour avoir la valeur d'une division en degrés.

89. Pour les thermomètres destinés aux arts ou aux usages ordinaires, on se borne à partager, sans graduation préalable, en cent parties d'égale longueur l'intervalle compris entre les deux points fixes. On trace la division sur une bande de papier, on l'introduit dans un tube plus large, qu'on soude au tube thermométrique.

Les degrés sont pris positivement au-dessus de zéro et négativement au-dessous.

90. Le thermomètre dont nous venons de donner la construction avec détail est connu sous le nom de thermomètre centigrade. Si l'intervalle compris entre la glace et l'eau bouillante est divisé en 80 parties, on aura le thermomètre de Réaumur. Ces deux thermomètres sont généralement employés en France, en Espagne et en Italie.

Le thermomètre en usage en Angleterre et en Allemagne a une division différente. Farenheit la proposa en 1724. Il a pour termes fixes la chaleur de l'eau bouillante et le froid produit par un mélange à parties égales de sel marin et de neige. L'intervalle compris entre ces deux points est divisé en 212 degrés; le 32e degré correspond à la glace fondante.

Le zéro de ce thermomètre présente quelque incertitude, car nous verrons à l'article des froids artificiels, qu'il faut la réunion d'un grand nombre de circonstances pour qu'un mélange réfrigérant produise le même degré de froid dans deux opérations différentes. On suit d'ailleurs aujourd'hui en Allemagne, pour le thermomètre de Farenheit, la marche que nous venons de tracer; on note 32 le point de la glace fondante, et 212 le point de l'eau bouillante.

Le thermomètre employé dans le nord, par exemple en Russie, ne diffère que par sa division du thermomètre centigrade. Cet instrument est à mercure; la température de l'eau bouillante est marquée 150; celle de la glace est marquée zéro. La divison proposée par Delisle, en 1733, a été abandonnée.

Il est souvent utile de traduire dans le langage de notre thermomètre les résultats d'observations faites avec les autres instrumens. Rien n'est plus simple que cette transformation; car 80 degrés de Réaumur, 180 de Farenheit, 150 de Delisle, correspondant à 100 degrés du thermomètre centigrade, il suffira donc d'une proportion pour l'opérer. Veut-on, par exemple, réduire 65 degrés de Réaumur en degrés centigrades, on aura $80 : 100 :: 65 : x = 65 \times 100/80 = 81°,25$.

Il faut avoir l'attention de retrancher préalablement 32 du nombre de degrés Farenheit, puisque le zéro centigrade correspond au 32e degré Farenheit. Ex. : pour savoir à quel degré centigrade correspond le 115e degré de Far., on fera la proportion $180 : 115 — 32 :: 100 : x = 46°,11$.

Il n'y aurait pas de soustraction à faire si l'on demandait simplement combien tel nombre de degrés Farenheit, par ex. 17, valent de degrés centigrades; on ferait la proportion $180 : 17 :: 100 : x$.

Les plus simples notions de calcul suffisent pour résoudre les différens cas particuliers qui peuvent se présenter.

91. Il nous paraît tout-à-fait superflu d'avoir recours au calcul pour démontrer que deux thermomètres construits sur la même échelle et avec des masses inégales de mercure, doivent s'accorder; car la dilatation pour chaque degré étant la centième partie de la dilatation de zéro à l'eau bouillante, les deux thermomètres plongés dans la même source de chaleur marqueront nécessairement le même nombre de degrés.

92. M. Bellani en Italie, M. Flaugergues en France, ont successivement constaté que le zéro du thermomètre varie avec le temps, ce qui tient à ce que la boule du thermomètre ayant été fortement chauffée au moment du travail, puis saisie au contact de l'air, a repris peu à peu le volume qu'elle doit avoir.

Une observation que j'ai faite récemment montre qu'il faut toujours, quand il s'agit d'expériences exactes, vérifier le zéro du thermomètre, puisqu'il monte quand ces instrumens sont tenus pendant un certain temps à une basse température, et baisse quand ils sont tenus à une température élevée. Ce n'est qu'au bout d'un certain temps qu'il reprend sa position primitive. Cette remarque s'applique à des thermomètres anciens comme à des thermomètres nouveaux.

Thermomètre à air.

93. Ce thermomètre sert rarement dans les expériences. On peut le construire en remplissant un tube d'air sec, et en séparant le fluide de l'air extérieur par une petite colonne de mercure (*fig.* 93 *bis*); on le gradue comme le thermomètre à mercure. La nécessité de tenir compte de la variation de la pression atmosphérique, et de donner à cet instrument une grande longueur, fait qu'on ne l'emploie que dans quelques cas particuliers. Par exemple, il est très utile, à cause de sa grande sensibilité, pour reconnaître si la température d'une chambre reste constante ou éprouve de légères variations. Pour ce dernier usage, on peut se borner à en comparer la marche à celle d'un bon thermomètre à mercure dans l'intervalle de quelques degrés. *Voyez* la

fin des dilatations pour la théorie complète du thermomètre et les divers pyromètres destinés aux températures élevées. *Voyez* encore les additions pour les calculs à l'aide desquels on établit la comparaison du thermomètre à air avec le thermomètre à mercure. Cette comparaison est nécessaire, à cause de la variation du coefficient de la dilatation de ce métal.

Du Thermomètre différentiel.

94. Il est des circonstances où le thermomètre, sous la forme que nous venons de lui donner, ne peut pas servir. Par exemple, quand il s'agit de mesurer la chaleur réunie par la réflexion au foyer d'un miroir, les indications du thermomètre ordinaire, sensible aux variations du milieu environnant, seraient inexactes. M. Leslie a imaginé un instrument qu'il nomme *thermomètre différentiel*, et dont la marche est indépendante de la température du milieu dans lequel il est plongé ; le tube de cet instrument a la forme d'un *U* (*fig.* 86), dont chaque branche est terminée par une boule. L'auteur donne à l'une de ces boules le nom de *boule focale*, parce qu'elle occupe le foyer du miroir réflecteur. Cette boule étant chauffée, l'air de son intérieur se dilate, et chasse vers l'autre boule une colonne d'acide sulfurique coloré. On gradue ce thermomètre en établissant une certaine différence, comme, par exemple, dix degrés centigrades, entre les températures des deux boules ; pour cela on enveloppe chaque boule d'un entonnoir en cuir, et l'on porte la boule focale à 10° au-dessus de l'autre boule. On divise le chemin parcouru par chaque extrémité de la colonne liquide en dix parties ou degrés. Le zéro de l'échelle correspond aux deux extrémités de la colonne, quand les boules ont la même température. On conçoit la possibilité de donner plus ou moins de sensibilité à cet instrument.

Le thermoscope de M. de Rumford (*fig.* 86) n'est que le thermomètre différentiel sous de plus grandes dimensions. Nous ferons connaître bientôt des expériences dans lesquelles de pareils instrumens ont été employés.

Voyez les phénomènes thermo-électriques, pour plusieurs nouveaux instrumens qui peuvent remplacer avec avantage le thermomètre différentiel.

Thermomètre à maximum et à minimum.

95. On connaît plusieurs instrumens de ce genre ; celui de Rutherford est représenté dans la *fig.* 78 *bis*; il se compose de deux thermomètres recourbés. Le liquide du premier *a b c* est du mercure, celui du second *e f g* est de l'alcool coloré par du carmin. Les tubes *b c* et *f g* sont horizontaux quand l'instrument est en expérience. L'index du thermomètre à maximum est un petit cylindre en acier *d*. Il peut couler dans le tube vide sans trop de frottement. Cet index est poussé par la colonne mercurielle quand la température s'élève, et reste en repos quand elle s'abaisse : ainsi la position de l'index marque la température la plus haute à laquelle l'instrument soit arrivé. L'index du thermomètre à minimum est un petit cylindre en émail, qui coule librement dans le tube, et qui n'est pas poussé par le liquide quand il se dilate. Le sommet de la colonne liquide l'entraîne quand elle se contracte. Cet index marque donc la température minimum. Quand on veut mettre l'instrument en expérience, on le relève, et l'on mène chaque index à l'extrémité de la colonne liquide correspondante. Le petit cylindre d'émail entre dans le liquide, celui de fer reste au dehors.

Six et Bellani ont donné successivement au thermomètre à maximum et à minimum une forme différente. On voit ce nouvel instrument dans la *fig.* 79.

Le réservoir *A* et une partie du tube jusqu'en *h* sont remplis d'alcool. Le tube *h m k* est plein de mercure. La boule *B* est en partie remplie d'air et en partie d'alcool. Le liquide descend jusqu'en *k*. Quand la température s'élève l'alcool de *A* se dilate, et pousse la colonne de mercure vers la boule *B*, l'air de celle-ci se laissant comprimer. Quand au contraire la température s'abaisse, l'alcool de *A* se contracte, l'air de *B* par son élasticité pousse la colonne vers *h*. Ainsi la branche du côté *A* marquera les températures maximum, la branche du côté *B* les températures minimum. On gradue ces différens instrumens en les comparant avec un thermomètre à mercure. Par exemple en les plongeant successivement dans de l'eau à 0 et à 30°. On prolonge l'échelle par le moyen d'un compas. L'index *d* ainsi que l'index *d'* est un cylindre de fer, enveloppé de verre. L'enveloppe de verre est étranglée, puis aplatie à son extrémité. Un cheveu *l m* forme une boucle élastique qui retient l'index quand celui-ci n'est pas poussé par le mercure. Quand on veut mettre l'appareil en expérience, on amène chaque index à la surface de la colonne de mercure, par le moyen d'un aimant. La figure nous dispense d'autres explications.

Le thermomètre à maximum proposé par M. Gay-Lussac diffère totalement des deux précédens. Voyez-en la description à l'article *Températures des Mers*. Nous renvoyons aussi à cet article pour celui que nous avons proposé.

Propriétés générales de la Chaleur rayonnante.

96. 1° La chaleur émane de tous les corps, sous forme de rayons. On peut s'en assurer en plaçant autour d'un corps chaud, dans une position quelconque, un thermomètre sensible ; cet instrument manifeste, par la dilatation du liquide qu'il ren-

ferme, l'absorption de la chaleur : l'effet ne peut être attribué à la propagation par le milieu environnant, puisqu'une pareille transmission a lieu dans le vide, et produit à distance égale le même effet, quelle que soit la position du thermomètre.

Il faut remarquer que dans l'air le thermomètre placé au-dessus du corps s'élèverait le plus, parce qu'il recevrait tout à la fois de la chaleur du rayonnement du corps et du contact de l'air. La partie du fluide qui toucherait le corps se dilaterait, et monterait par sa légèreté.

3° La chaleur se réfléchit comme la lumière, en faisant l'angle d'incidence égal à l'angle de réflexion. Pour mettre cette propriété en évidence, on place deux miroirs sphériques concaves en face l'un de l'autre, et de manière qu'ils aient leur axe commun.

Pour comprendre facilement cette expérience, il suffit de savoir que le foyer d'un miroir sphérique est sur le milieu du rayon. Ainsi un rayon lumineux *m m'* (*fig.* 95), tombant en *m*, parallèlement à l'axe des deux miroirs, se réfléchit et passe par le point *F*, milieu du rayon *B C* : il en est de même de tout autre rayon parallèle à l'axe *B B'*. Si l'on mesure les angles *F m C* et *m' m C*, on les trouve parfaitement égaux. Maintenant, puisque l'effet d'un corps chaud placé au foyer *F'* du second miroir, se concentre presque en totalité au foyer *F* du premier, il faut que, dans sa réflexion, la chaleur fasse un angle égal à l'angle d'incidence. L'échauffement du corps froid n'est pas dû à une transmission directe ; car, placé dans un autre point *H* plus rapproché du corps chaud, il est beaucoup moins échauffé. Cette expérience est très ancienne; Mariotte, dans son *Traité des Couleurs*, en fait déjà mention, en 1717. Dufay, en 1726, fit voir qu'on peut ainsi enflammer des corps combustibles à plus de 50 pieds de distance; que la chaleur traverse cet intervalle dans un instant inappréciable.

Nous citerons une expérience de sir H. Davy, qui peut s'exécuter dans le vide. Elle consiste à réunir les deux extrémités d'une pile voltaïque (voy. la Pile) par un morceau de charbon *c*, placé au foyer d'un miroir *m n* (*fig.* 83). Bientôt le charbon devient incandescent, et échauffe un thermomètre très sensible, dont le réservoir *a* occupe le foyer d'un second miroir *m' n'*. La position du corps chaud ne permet pas d'attribuer au mouvement de l'air l'effet produit sur le thermomètre, puisque ce fluide devient plus léger en devenant plus chaud, et conséquemment tend à s'élever. D'ailleurs il est facile de faire le vide dans le large tube qui renferme cet appareil. (*Elemens of Chem. phil.*, vol. 1.)

3° *L'intensité de la chaleur est en raison inverse du carré de la distance.* Par l'expérience on reconnaît que l'intensité décroît rapidement; mais on se rendra facilement raison de la loi du décroissement, si l'on suppose un corps chaud placé au centre de plusieurs sphères concentriques; chacune de ces sphères, prise isolément, recevra sur sa surface la même quantité de chaleur; et comme les surfaces sphériques sont proportionnelles aux carrés de leurs rayons (distances du corps chaud à leurs surfaces), il en résulte que l'intensité de la chaleur sur chacune de ces sphères sera en raison inverse du carré de son rayon ou du carré de la distance au corps chaud : ce qu'on voulait démontrer.

97. Tous les corps se laissent pénétrer par la chaleur rayonnante; le passage de la chaleur dans l'intérieur des substances diaphanes a donné lieu à des recherches ingénieuses, dont nous rapportons ici les principaux résultats.

Laroche a fait voir, il y a un petit nombre d'années, que la chaleur traverse le verre avec d'autant plus de facilité que la température de la source est plus élevée. Cette loi, qu'on avait crue générale pour toutes les substances diaphanes, doit être modifiée d'après les recherches de M. Melloni. (*Ann. de Chim. et de Phys.*, t. 53 et 54.)

Le sel gemme, pris en lames minces ou épaisses, laisse passer *la même proportion* de toute espèce de chaleur, quelle qu'en soit l'origine.

Toute autre substance diaphane suit la loi de Laroche, à moins qu'elle ne soit réduite en lame très mince; alors elle transmet la même proportion de chaleur, quelle que soit la source.

Sur trente substances essayées, aucune, à l'exception du fluate de chaux et du sel gemme, ne laisse passer la chaleur rayonnante des corps à 100° (1).

La lampe de Locatelli employée dans les expériences est à simple courant d'air et sans verre. En sorte que la chaleur qui en émane n'est pas modifiée par une transmission, avant d'être soumise à l'expérience.

Laroche a encore établi que la chaleur qui a traversé une lame de verre est plus propre à en traverser une *seconde lame*. La perte devient d'autant moindre que la chaleur a déjà traversé une plus grande épaisseur. M. Melloni a vérifié ce fait par des expériences multipliées.

La chaleur transmise par une seconde lame dépend aussi de la lame déjà traversée.

Ainsi supposons que l'effet produit par la chaleur

(1) Voici quelques résultats :

LAMES de 2mm,6.	TRANSMISSION sur 100 rayons.			
	Lampe de Locatelli.	Platine incandescent.	Cuivre chauffé à 360°.	Cuivre chauffé à 100°.
Sel gemme (diaphane incolore).	92	92	92	92
Sel gemme (louche, diaphane). .	65	65	65	65
Chaux fluatée (diaphane incol.). .	78	69	42	33
Cristal de roche (diaphane incol.).	58	28	6	0
Acide citrique (diaphane incol.) .	11	2	0	0
Alun (diaphane incolore)	9	2	0	0
Glace très pure.	6	0	0	0

transmise à travers une lame d'acide citrique, soit de 30°, et qu'on reçoive cette chaleur sur une lame d'alun, il n'y aura que 3 à 4° de diminution; si à l'acide citrique on substitue une autre substance, et qu'on dispose l'appareil de manière à avoir 30° environ, la perte par le passage à travers l'alun sera beaucoup plus grande.

La chaleur transmise par une lame devient plus ou moins propre à être réfléchie par les surfaces noires ou blanches. (M. Powell.)

La transparence pour la chaleur diffère totalement de la transparence pour la lumière. Ainsi du quarts enfumé laisse passer cinq fois autant de chaleur que l'alun le plus transparent. Voilà pourquoi M. Melloni a proposé d'appeler *diathermanes* les corps qui laissent passer facilement la chaleur, et *athermanes* ceux qui ne la laissent passer que difficilement (1).

Les métaux sont athermanes; néanmoins sous de petites épaisseurs, les métaux doivent être diathermanes, sans quoi on ne concevrait pas bien le décroissement de l'intensité de la chaleur émise ou réfléchie sous des obliquités plus ou moins grandes.

Le bois n'est pas complètement athermane. Une planche de sapin de 1/8 de pouce laisse passer 1/5 de toute la chaleur qui tombe sur sa surface. (Leslie.)

La chaleur rayonnante peut traverser de grandes épaisseurs d'un corps cristallisé; ainsi l'effet produit à travers une lame de spath d'Islande de 2mm,6 étant de 21°,8, n'est réduit qu'à 18°,5 par une lame de 90mm. Une lame de sel gemme de 3m ou de 80mm laisse passer la même quantité de chaleur.

On avait d'abord pensé que la chaleur rayonnante s'arrête à la première face, puis se propage de proche en proche, comme cela doit avoir lieu pour les corps opaques; il n'en est pas ainsi, puisque la chaleur rayonnante traverse une nappe d'eau dont les parties sont sans cesse renouvelées (Prevost), puisqu'en couvrant de noir de fumée la face antérieure d'une lame diaphane, on obtient un effet beaucoup plus petit qu'avec une lame nue. (Laroche.)

Déjà les expériences de Laroche avaient conduit ce savant à admettre plusieurs espèces de rayons de chaleur inégalement transmissibles. Le déplacement du maximum de chaleur du spectre par des substances de nature différente, avaient aussi fait penser que les corps diaphanes incolores, exerçaient sur la chaleur solaire une absorption analogue à celles qu'exercent les milieux transparens colorés sur les divers rayons de lumière, c'est-à-dire que les milieux transparens incolores arrêtent certains rayons et en laissent passer d'autres.

M. Melloni vient de faire avec le thermo-multiplicateur de Nobili, régularisé par lui, un grand nombre d'expériences qui semblent mettre hors de doute cette proposition : savoir, que la chaleur obscure est composée de divers rayons qui jouissent à des degrés différens de la propriété d'être transmis par les substances diaphanes.

La chaleur rayonnante se réfracte comme on le démontre à l'aide d'une lentille en sel gemme; la variation de la source paraît faire varier la réfrangibilité.

98. L'inclinaison de la surface, par rapport à une direction déterminée des rayons calorifiques, a aussi une influence sur l'intensité de l'effet produit. Leslie a reconnu le premier par l'expérience que l'action d'une surface rayonnante est proportionnelle au sinus de l'angle formé par cette surface avec la direction des rayons émis.

Pour constater cette propriété de la chaleur rayonnante, placez en face d'un miroir concave un cube plein d'eau à une température déterminée; mesurez l'effet produit sur la boule focale d'un thermomètre différentiel placé au foyer de ce miroir; inclinez ensuite le cube, en le faisant tourner sur une ligne passant par son centre et perpendiculaire à l'axe du miroir, vous observerez que, quelle que soit l'inclinaison, l'effet sur le thermomètre différentiel reste le même. Il est bien entendu que, pour chaque position de la surface, il faut remettre le cube et le thermomètre dans le même état qu'au commencement de la première expérience, et que de plus, la surface chaude soit assez étendue pour que sa projection sur le miroir couvre toujours complètement l'ouverture d'un écran placé vis-à-vis du miroir. Il résulte de cette expérience qu'en général le pouvoir rayonnant d'une surface évaluée dans une certaine direction, est égal à celui de sa projection sur une surface perpendiculaire à cette direction. Ainsi l'action calorifique de la surface polygonale ou de la demi-sphère $ACDB$ (*fig.* 94), est égale à celle de la face plane AB dans la direction TL (1).

(1) Διὰ à travers, θερμαίνω chauffer.

(1) Soient AC (*fig.* 94 *bis*) la face perpendiculaire à la direction HK des rayons, CD la face inclinée; la portion de la face CD qui échauffe le miroir est à la portion de la face AC' qui produit le même effet comme 1 est à sin. $C'D'F$ ou sin. $D'OK$. Il faut donc que l'intensité de la chaleur qui part de CD dans la direction HK, soit à l'intensité de la chaleur partie de la face perpendiculaire AC', comme sin. $D'OK$ est à 1; les pouvoirs rayonnans r et r' de deux surfaces, faisant avec la direction HK des angles a et a', seront donc dans le rapport direct des sinus de ces angles, c'est-à-dire qu'on aura

$$r : r' :: \text{sin. } a : \text{sin } a',$$

d'où r sin. $a = r'$ sin. a. Si l'une des faces, par exemple AC', est normale à la direction HK, on aura $r' = r$ sin. a', r étant l'intensité de la chaleur émise par AC.

L'angle $D'OK$ est complément de KOL formé par la normale OL à la face rayonnante et la direction HK. La relation précédente peut donc se mettre aussi sous cette forme $r' = r$ cos KOL.

M. Fourrier a démontré le théorème d'une autre ma-

99. Le même corps porté à la même température n'émet pas toujours la même quantité de chaleur; moins il en émet et plus il est propre à la réfléchir. Ainsi le pouvoir émissif du fer poli est faible, tandis que le pouvoir réfléchissant en est considérable; c'est le contraire pour le fer rouillé. Nous reviendrons plus loin sur ce sujet.

100. L'action répulsive de la chaleur qui produit la dilatation, paraît, d'après les expériences de M. Fresnel, s'exercer aussi à des distances sensibles.

L'étude des chapitres suivans fera connaître d'autres propriétés de la chaleur.

DES DILATATIONS.

101. Tous les corps changent de volume lorsqu'ils changent de température. Les variations des dimensions des corps ont dans les expériences une influence dont il faut savoir tenir compte.

La connaissance exacte de ces changemens est une des plus importantes de la physique; sans cette connaissance on n'aurait qu'une idée très imparfaite du thermomètre et de la plupart des nombreux phénomènes qu'offre l'histoire de la chaleur. C'est pourquoi nous ferons l'étude des dilatations avec un grand soin.

Nous exposerons d'abord les procédés à l'aide desquels on les détermine; nous citerons ensuite les principales applications.

Dilatation des gaz.

102. Nous commençons par les gaz, parce que ces corps présentent dans leur dilatation une grande régularité. Tous se dilatent *de la même manière* et *de la même quantité*. Pour déterminer avec précision cette dilatation, il faut connaître le volume soumis à l'action de la chaleur. Pour cela on fait choix d'un tube gradué semblable à celui du thermomètre, et l'on y soude une boule ou un cylindre. On trouve la capacité de la boule et celle d'une division du tube en pesant le petit appareil, d'abord vide, puis plein de mercure jusqu'à la première division, et enfin complètement plein du même métal; on a soin de faire bouillir le mercure, afin de chasser l'air et l'eau qui pourraient adhérer aux parois du verre.

Soit p le poids de l'appareil vide, p' le poids de l'appareil rempli de mercure jusqu'à la première division, $p'-p$ sera le poids du mercure contenu dans la boule : soit p'' le poids de l'appareil totalement rempli de mercure, $p''-p'$ représentera le mercure que renferme tout le tube depuis la première division; et si n est le nombre des divisions, $\frac{p''-p'}{n}$ sera la quantité de mercure contenue dans chaque division. On peut donc avoir, par cette opération, le rapport entre la capacité d'une division du tube et celle de la boule prise jusqu'à la première division et même jusqu'à une division quelconque.

L'air soumis à l'expérience doit être parfaitement desséché (1); on l'obtient ainsi en fixant au tube rempli de mercure un autre tube plus large renfermant du chlorure de calcium fondu (*fig.* 90). On renverse ce petit appareil, on le secoue, le mercure tombe, et l'air entre dans le tube, desséché par son passage sur le chlorure; on s'arrange de manière à laisser dans le tube une petite colonne de mercure, qui doit rester à peu de distance de la boule quand celle-ci plonge dans la glace : on parvient aisément à ce résultat par un peu de tâtonnement. Pour un autre gaz, il faudrait visser l'appareil sur une cloche remplie de ce gaz, et placée sur une cuve à mercure.

Maintenant il ne reste plus qu'à porter le gaz à différentes températures. A cet effet, on place le tube horizontalement dans une caisse en fer-blanc, remplie d'abord de glace, ensuite d'eau à 10°, à 20°, etc., jusqu'à 100 degrés; on a soin à chaque opération d'enfoncer le tube jusqu'à l'index m. La température de l'eau est donnée par plusieurs thermomètres. On reconnaît, en faisant cette expérience avec un gaz quelconque, que l'index marche *d'un égal nombre de divisions* pour *un même nombre de degrés; la dilatation est donc une même fraction du volume à zéro.*

La dilatation ainsi obtenue n'est que la dilatation apparente, puisqu'on ne tient pas compte du changement de la capacité du vase; cette correction, à la vérité, peut être négligée parce que la dilatation des gaz est très grande, comparativement à celle des solides. On verra d'ailleurs plus loin qu'il faudrait ajouter la dilatation de l'enveloppe à la dilatation apparente, pour avoir la dilatation absolue.

nière. Il s'est appuyé sur ce fait, savoir : que la chaleur rayonnante part d'une certaine profondeur, comme il résulte des expériences que nous ferons connaître.

Supposons qu'on décrive du centre de l'élément $m\,n$, *fig.* 83 *bis*, une sphère qui ait pour rayon la distance à laquelle les molécules intérieures participent au rayonnement. Concevons deux petits cylindres $m\,n\,v\,u$ et $m\,n\,p\,q$; ces cylindres ont même hauteur; ainsi une file de molécules aura la même action dans l'un ou l'autre cylindre; mais la quantité de files de molécules du cylindre incliné $p\,q\,m\,n$ sera à la quantité du cylindre $v\,u\,m\,n$ comme $m\,n' : m\,n$ ou $:: mn \times \cos nmn' : m\,n$ ou $:: \cos nmn' : 1$ ou $:: \cos \alpha : 1$, ou $:: \sin \alpha' : 1$.

Ainsi i étant l'intensité du rayonnement de $m\,n$ dans la direction normale, $m\,k$ et i' l'intensité dans la direction inclinée $m\,r$, on a $i' = i \cos \alpha = i \sin \alpha'$.

(1) Si ce gaz n'était pas préalablement desséché, la vapeur qu'il contiendrait se déposerait en partie à l'état de glace, quand la caisse serait à la température 0°, et cette glace se réduirait en vapeur à une température plus élevée. On attribuerait donc à la dilatation du gaz un effet dû à la réduction de l'eau en vapeur.

Ce procédé a été mis à exécution à peu près en même temps par M. Dalton en Angleterre, et par M. Gay-Lussac en France : le premier a trouvé 0,00372, et le second 0,00375, pour la dilatation correspondante à chaque degré centigrade. Le nombre de M. Gay-Lussac, qui s'accorde avec celui qu'a donné l'astronome Tobie Mayer, pour l'air, paraît être le véritable nombre. Le nombre 0,00375 ou 1/267, exprimant la fraction du volume à 0°, dont se dilate un volume de gaz pour un degré centigrade, est ce qu'on appelle *le coefficient de dilatation*.

L'air humide, dans le même appareil, se dilate comme l'air desséché; la vapeur d'éther sulfurique placée dans un tube gradué à côté d'un tube semblable, contenant un volume égal d'air sec, se dilate comme ce dernier fluide : il est, d'après cela, très probable que toutes les vapeurs ont le même coefficient de dilatation que les gaz permanens. Pour ces dernières expériences, la température doit être telle que la vapeur ne change pas d'état.

M. Charles avait constaté depuis long-temps l'égale dilatation des gaz, comme le déclare M. Gay-Lussac dans son mémoire; mais il ne s'était occupé ni des gaz solubles, ni de l'étendue de la dilatation. Les résultats précédens ont été confirmés par les recherches de MM. Dulong et Petit, qui se sont assurés que la même uniformité de dilatation se soutient dans l'intervalle de — 36° à + 300 degrés. Sir Humphry Davy a constaté que le coefficient de la dilatation de l'air n'est changé ni par la raréfaction ni par la condensation de ce fluide.

Les notions précédentes suffisent pour mettre un lecteur attentif en état de faire, sur les gaz, toutes les corrections qui ne dépendent que du changement de température.

1er exemple : *Porter à 45° un volume de 35lit.,55 d'air pris à zéro*.. Un volume quelconque se dilate de 0,00375 pour chaque degré; 35lit.,55, de 0° à 45°, se dilateront de 0,00375 × 45 × 35,55, ce qui fait 5lit.,999 pour la dilatation totale, qui, ajoutée au volume 35lit.,55, donne 41lit.,549 pour le volume dilaté à 45 degrés.

2e exemple : *Ramener à zéro un volume d'air de 153lit.,27 pris à 36°,5*. Comme le coefficient de dilitation 0,00375 est relatif au volume à zéro, on ne peut le faire porter que sur ce dernier volume. Supposons-le connu et représenté par V : de zéro à 36°,5, il serait augmenté de $V \times 0{,}00375 \times 36{,}5$, et deviendrait $V \times 1{,}137$; mais il est égal à 153,27. Il faut donc diviser 153,27 par 1,137, pour avoir le volume à zéro; en effectuant le calcul, on trouve 134lit.,802.

3e exemple: *Ramener à 36°,25 le volume 83lit.,547 pris à 11°,23*. On cherche d'abord le volume à zéro, en opérant comme dans le second exemple; on trouve qu'il faut diviser 83,547 par $1 + 0{,}00375 \times 11{,}23$, ou par 1,042, ce qui donne 80lit.,179. Il faut ensuite, pour porter ce dernier volume à 36°,25, faire la même opération que pour le premier exemple, c'est-à-dire le multiplier par $1 + 0{,}00375 \times 36{,}25$, ou par 1,136; on trouve ainsi 91lit.,083 (1).

Toutes les questions sur les volumes des gaz rentreraient dans les trois exemples ci-dessus.

Dilatation absolue des Liquides.

103. La dilatation des liquides et des solides est loin de présenter la simplicité que nous avons trouvée dans celle des gaz; chacun d'eux a un *coefficient particulier de dilatation, et le nombre qui l'exprime croît avec la température*. Si l'on pouvait se procurer un vase transparent, et conservant la même capacité à toutes les températures, rien ne serait plus simple que la détermination de la dilatation des liquides; il suffirait de former un thermomètre avec chaque liquide, et de le porter à différentes températures. Mais comme toute matière, transparente ou opaque, varie dans son volume aux diverses températures, on doit avoir recours à un procédé qui donne la dilatation des liquides, indépendamment des changemens de la capacité du vase qui les renferme. MM. Dulong et Petit (*An. de Chim. et de Phys.*, t. 7) ont suivi une méthode dont la première idée est due à Boyle et qui remplit cette condition; elle est fondée sur ce principe d'hydrostatique, que lorsque deux colonnes liquides sont en communication par un tube latéral, les hauteurs verticales de ces colonnes sont en raison inverse des densités (n° 43) : de sorte qu'en entourant de glace l'une des colonnes (*fig.* 81), en portant l'autre à une température connue, et en mesurant la hauteur de chaque colonne, on a tout ce qui est nécessaire pour connaître la dilatation absolue du liquide soumis à l'expérience, comme on le voit par un calcul assez simple (2).

(1) Si V est le volume du gaz à une température t, et qu'il faille le porter à une autre température t', on voit par les exemples ci-dessus qu'on a d'abord le volume à zéro en divisant V par $1 + 0{,}00375\,t$. En multipliant le résultat par $1 + 0{,}00375\,t'$, on a $V\dfrac{(1 + 0{,}00375\,t')}{(1 + 0{,}00375\,t)}$ pour le volume demandé à la température t'.

Si $t = o$, la formule devient $V(1 + 0{,}00375\,t')$: c'est le premier cas; si $t' = o$, elle devient $\dfrac{V}{1 + 0{,}00375\,t}$: c'est le second.

(2) Si h et h' désignent les hauteurs des colonnes, aux températures o et t, d et d' les densités correspondantes, on a,

$$h : h' :: d' : d.$$

Mais d et d' sont en raison inverse des volumes V et V' qu'occuperaient une même masse de liquide, aux températures o et t; on a donc :

$$d' : d :: V : V'.$$

Les hauteurs des colonnes étaient déterminées par une lunette qu'on faisait mouvoir le long d'une règle verticale bien fixée.

La température était connue par le moyen d'un thermomètre à air et d'un thermomètre à mercure très sensibles. Les résultats des expériences démontrent, pour le mercure, la loi générale que nous avons déjà énoncée sur l'accroissement du coefficient de dilatation avec la température.

Températures du thermomètre à air.	Dilatations cubiques absolues moyennes du mercure.	Températures indiquées par la dilatation du mercure, supposée uniforme.
0	0	0
100	$\frac{1}{5550}$	100
200	$\frac{1}{5425}$	204,61
300	$\frac{1}{5300}$	314,15

La première colonne contient les températures déduites de la dilatation de l'air. (Voy. plus loin.)

La seconde renferme les dilatations absolues du mercure, entre zéro et chacune des températures indiquées dans la première colonne.

La troisième comprend les températures obtenues dans la supposition d'une dilatation uniforme.

La dilatation du mercure, déterminée par les expériences précédentes, nous paraît ne rien laisser à désirer; elle est un peu plus faible que la dilatation 1/5412 trouvée par MM. Lavoisier et Laplace.

La connaissance de la dilatation du mercure est indispensable dans un grand nombre d'expériences, et particulièrement dans les observations barométriques. Elle nous servira aussi plus loin pour déterminer la dilatation du verre, et, par suite, celle des différens métaux.

Nous joindrons ici une table de dilatation, dont les résultats n'ont pas une grande précision, et qu'il est cependant utile de connaître.

D'où $h' : h :: V' : V$, et par suite $\frac{h'-h}{h} = \frac{V'-V}{V}$.

Or $\frac{V'-V}{V}$ exprime la dilatation du liquide pour l'intervalle de température t et pour l'unité de volume; comme cette expression est égale à $\frac{h'-h}{h}$ et que les hauteurs h' et h sont indépendantes du changement de volume subi par le tube pendant l'expérience, il en doit être de même de $\frac{V'-V}{V}$; $\frac{h'-h}{ht}$ représente dont le coefficient de la dilatation absolue du liquide.

Table de la dilatation de plusieurs liquides pour l'intervalle de zéro à l'eau bouillante.

Eau		1/22
Acide hydrochlorique	(dté 1,137)	1/17
Acide nitrique	(dté 1,40)	1/9
Acide sulfurique	(dté 1,85)	1/17
Alcool	(dté 0,817)	1/9
Éther sulfurique		1/14
Huiles d'olive et de lin		1/12
Essence de térébenthine		1/14
Eau saturée de sel marin		1/20

104. M. Gay-Lussac a récemment fait de la dilatation des liquides le sujet de ses recherches; il a soumis à ses expériences l'eau pure, l'alcool, l'éther sulfurique et le sulfure de carbone. Ces liquides étaient parfaitement purifiés; il a supposé le volume de chaque liquide représenté par 1,000 au point d'ébullition, et il a évalué le volume correspondant aux températures inférieures.

Il résulte de ces expériences que la contraction de chaque liquide diminue à mesure qu'on l'éloigne du point d'ébullition : que l'alcool et le sulfure de carbone se dilatent également; et comme, d'après l'observation de M. Gay-Lussac, ces deux liquides, portés aux températures respectives de leur ébullition, produisent des volumes égaux de vapeur (*Ann. de Chim. et de Phys.*, t. 2 p. 130), il paraîtrait qu'il existe une certaine dépendance entre la dilatation d'un liquide et le volume de vapeur qu'il produit.

Dilatation apparente des Liquides.

105. La dilatation apparente n'est autre chose que la dilatation observée dans un vase, abstraction faite de la dilatation de ce vase.

Pour déterminer la dilatation apparente du mercure, MM. Dulong et Petit se sont servis d'un tube de 6 décimètres de longueur, pouvant contenir à peu près 700 grammes de mercure, fermé à l'une de ses extrémités, et terminé à l'autre par un tube capillaire, dont la capacité n'était qu'une très petite fraction de la capacité totale. Cet appareil était porté successivement de zéro à 100, à 200 et à 300 degrés. La dilatation apparente était donnée par la quantité de mercure qui sortait du tube à chaque opération. En effet, soit P le poids total du mercure contenu dans le tube à zéro; soit P' le poids de ce métal chassé par la chaleur : cette quantité sera la dilatation apparente de $P - P'$, puisqu'elle remplit de 0 à t, tout l'espace au-dessus de $P - P'$, et que nous supposons l'enveloppe sans dilatation; ainsi $\frac{P'}{P-P'}$ est le rapport entre le poids du volume sorti du tube, et le poids du

volume restant; ce rapport exprime la dilatation pour t degrés; en le divisant par t, on aura le coefficient de la dilatation apparente. On substitue ici les poids aux volumes, ce qui est tout-à-fait permis, puisqu'à une même température les poids sont proportionnels aux volumes.

La même détermination s'obtient d'une autre manière : supposons par exemple qu'on connaisse le rapport entre la capacité d'une division du tube d'un thermomètre et celle de la boule jusqu'à zéro; soit p la quantité de mercure contenu dans une division, soit P le poids total du mercure que renferme le thermomètre; si maintenant pour un nombre t de degrés, le mercure se dilate de n divisions, la dilatation apparente pour l'unité de volume et de température sera évidemment $\frac{n\,p}{P\,t}$.

Remarque. Les résultats sont les mêmes, quelle que soit l'épaisseur des tubes, ce qui montre que le volume intérieur d'un vase a une dilatation égale à celle d'un pareil volume de la matière dont le vase est formé.

Tableau des résultats.

Températures déduites de la dilatation de l'air.	Dilatations apparentes moyennes du mercure.	Dilatations absolues du verre en volume.	Température déduites de la dilatation du verre, supposée uniforme.
100	$\frac{1}{6480}$	$\frac{1}{38700}$	100
200	$\frac{1}{6378}$	$\frac{1}{36300}$	213,2
300	$\frac{1}{6318}$	$\frac{1}{329000}$	352,9

Le nombre 1/6480 de la dilatation apparente est un peu plus faible que 1/6459 déduit des expériences de MM. Lavoisier et Laplace. Mais comme ces savans n'avaient pas fait bouillir le mercure dans le vase qu'il ont employé, ils ont dû trouver une dilatation trop forte.

La troisième colonne renferme les résultats qui expriment la dilatation cubique du verre. Ils sont la différence entre les nombres de la seconde colonne et la dilatation absolue du mercure trouvé précédemment.

La quatrième indique les températures que marquerait un thermomètre en verre gradué entre zéro et l'eau bouillante à la manière ordinaire, dans la supposition d'une dilatation uniforme.

Dilatation des Solides.

106. Comme les dilatations des corps solides sont très petites, il faut employer des procédés rigoureux pour les mesurer. Ces dilatations ont été le sujet de nombreux travaux; mais la plupart des instrumens imaginés pour cet objet sont affectés de causes d'erreur : nous exposerons les principaux procédés, avec assez de détails pour les bien faire concevoir, et nous joindrons les résultats les plus importans qu'ils aient fournis.

107. *Dilatation linéaire.* 1er *procédé.* MM. Lavoisier et Laplace ont fixé la barre métallique dont ils voulaient connaître la dilatation dans une position horizontale, contre un plan de verre; ce plan était maintenu dans une position verticale invariable. L'autre extrémité de la barre s'appuyait également contre une lame de verre mobile autour d'un axe horizontal, et dont l'extrémité faisait mouvoir une lunette dirigée sur une mise placée à une grande distance. Un allongement d'une ligne dans la barre métallique soumise à l'expérience faisait parcourir à la lunette, lorsque la mire était placée à 100 toises de distance, 744 lignes, ce qui donnait la facilité de diviser la ligne en 744 parties, et conséquemment la possibilité d'apprécier une dilatation égale à 1/744 de ligne.

La barre était portée de la température de la glace fondante à celle de l'eau bouillante; elle avait six pieds de longueur. L'erreur apportée par la dilatation des deux lames de verre était négligeable par rapport à la dilatation de la longueur de la barre. La *fig.* 75 peut donner une idée nette de l'appareil. CD est la barre métallique, $A\ B$ la lame de verre fixe, $F\ K$ la lame mobile autour de l'axe horizontal, O, le point fixe, L, la lunette, $P\ R$ la mire. Les deux illustres académiciens français ont soumis à leurs recherches tous les métaux connus à l'époque de leurs expériences (1782).

Ces expériences n'avaient pas été publiées par les auteurs. Les résultats que nous venons de rapporter ont été conservés par les soins de madame Lavoisier.

2e *procédé.* Il appartient à Ramsden et réunit beaucoup de simplicité à beaucoup d'exactitude. La barre métallique a cinq pieds de longueur; elle est placée horizontalement dans une auge en cuivre remplie d'eau; ce liquide, chauffé par douze lampes à alcool, est porté sans difficulté jusqu'à l'ébullition.

Deux auges en bois sont disposées parallèlement à l'auge en cuivre; celle-ci est au milieu des premières; chacune de ces deux auges renferme une barre en fonte; à chacune des deux extrémités d'une de ces deux barres est un microscope maintenu dans une position horizontale et perpendiculaire à la barre, dirigé à la fois sur les trois extrémités correspondantes des barres. D'abord les trois barres sont à la température de la glace fondante. Si ensuite la barre qui est dans l'auge en cuivre est chauffée, tandis que les deux autres conservent la même température, on peut, par le secours des microscopes, mesurer l'accroissement en longueur que subit la première. (*Philosoph. Transact.* v. 75,

p. 490.) Pour cela, on ramènera les trois extrémités d'un même coté sur une même ligne, et, par le chemin que parcourt le micromètre de l'extrémité opposée de la barre en cuivre, pour se trouver sur la droite qui réunit les extrémités correspondantes des deux barres en fonte, on jugera de la dilatation. Au reste, l'appareil étant donné, on pourrait imaginer différens moyens propres à mesurer la dilatation.

Tableau des dilatations linéaires.

NOMS DES SUBSTANCES d'après LAVOISIER ET LAPLACE.	COEFFICIENT pour cent degrés, depuis la glace fondante jusqu'à l'eau bouillante.	
	En fractions ordinaires.	En fractions décimales.
Glace de Saint-Gobin.	1/1122	0,0008912
Tube de verre sans plomb.	1/1142	0,0008756
Tube de verre sans plomb.	1/1114	0,0008976
Autre tube de verre sans plomb.	1/1090	0,0009174
Flint-glass anglais.	1/1248	0,0008012
Verre de France avec plomb.	1/1147	0,0008718
Cuivre.	1/581	0,0017211
Autre cuivre.	1/584	0,0017123
Cuivre jaune ou laiton.	1/535	0,0018691
Autre cuivre jaune ou laiton.	1/529	0,0018903
Fer doux forgé.	1/819	0,0012210
Fer rond passé à la filière.	1/812	0,0012315
Acier non trempé.	1/927	0,0010787
Plomb.	1/351	0,0028490
Etain des Indes ou de Mélac.	1/516	0 0019364
Etain de Falmouth.	1/462	0,0021730
Argent de coupelle.	1/524	0,0019084
Argent au titre de Paris.	1/524	0,0019084
Or de départ.	1/682	0,0014661
Or au titre de Paris, non recuit.	1/645	0,0015504
Or au titre de Paris, recuit.	1/661	0,0015128
Platine (selon Borda).	1/1167	0,0008569
Zinc d'après Smeaton.	1/340	0,002942
Fer fondu d'après le général Roy.	1/901	0,001110
Palladium d'après Wollaston.	1/1000	0,001000

108. Quand on connaît, par le procédé dont il vient d'être question, la dilatation d'un corps solide on détermine facilement la dilatation de tous les autres, en observant la marche d'un pyromètre formé par l'assemblage de deux règles métalliques réunies invariablement par une de leurs extrémités. C'est là le pyromètre employé par Borda et par Deluc. *Voyez* la *fig.* 103.

Dans les expériences de MM. Dulong et Petit, deux barres de 12 décimètres de longueur, de 25 millimètres de largeur et de 4 millimètres d'épaisseur, étaient réunies par une de leurs extrémités au moyen d'une traverse en fer, sur laquelle elles étaient fixées par de fortes vis (*fig.* 72). Chaque règle portait à son extrémité une tige de laiton s'élevant d'abord verticalement et se repliant ensuite horizontalement. Les branches horizontales étaient munies, l'une d'une échelle divisée en cinquièmes de millimètre, l'autre d'un vernier. La dilatation linéaire ainsi obtenue étant la différence entre les dilatations des deux métaux, et l'une d'elles étant connue, l'autre s'en déduisait (1).

(1) Soit l la longueur commune des deux barres; soit C le coefficient connu de la dilatation linéaire de l'un des deux métaux; X le coefficient inconnu de l'autre métal; t la température; N l'espace parcouru par la lunette; on a $Clt - Xlt = N$: d'où l'on tire la valeur de X.

Ces deux règles, plongées dans un bain d'huile, étaient portées à différentes températures. En faisant cette expérience avec une lame de fer jointe successivement à des lames de cuivre et de platine, les physiciens cités ont trouvé les nombres suivans (1) :

Température du thermomètre à air.	Dilatations moyennes absolues du fer.	Dilatations moyennes absolues du cuivre.	Dilatations moyennes absolues du platine.
100	$\frac{1}{84600}$	$\frac{1}{59200}$	$\frac{1}{113100}$
300	$\frac{1}{68100}$	$\frac{1}{53100}$	$\frac{1}{108900}$

109. *Dilatation cubique.* Le procédé propre à la détermination de la dilatation cubique est beaucoup plus simple que ceux que nous venons de décrire pour les dilatations linéaires, et il est de plus susceptible d'une très grande précision. MM. Dulong et Petit l'ont employé et l'ont exposé dans le mémoire cité plus haut. Ce procédé exige qu'on connaisse préalablement la dilatation absolue du mercure et celle d'un corps solide, par exemple, celle du verre; cette dernière est la différence entre la dilatation absolue et la dilatation apparente du mercure. Ainsi, D et d représentant la dilatation absolue et la dilatation apparente du mercure, d' la dilatation absolue du verre, on aura $d' = D - d$.

On concevra mieux cela, en remarquant que la dilatation apparente du mercure dans un vase en verre n'est que la dilatation absolue de ce métal, diminuée de la dilatation d'un volume de verre égale à la capacité du vase. C'est-à-dire qu'on a $d = D - d'$.

D et d ont été déterminés plus haut; ainsi l'on connaît d' la dilatation du verre.

La formule $d' = D - d$ n'est qu'approximative. En effet, soit V le volume du mercure à 0; à 1° ce volume deviendra $V(1+D)$; soit V' la capacité à 0 de la partie du vase qui renferme $V(1+D)$; ce volume deviendra $V'(1+d')$ 1°; mais on a $V(1+D) = V'(1+d')$, d'où $D = \frac{V'-V}{V} + \frac{V'}{V}d'$. $= d + \frac{V'}{V}d'$. Si l'on suppose $\frac{V'}{V} = 1$, ce qui est très près de la vérité, on retombe dans la formule $D = d + d'$ ou $d' = D - d$.

(1) Les procédés du n° 107 donnent les dilatations linéaires; en les triplant on a les dilatations cubiques. Pour justifier cette opération, soit 1 le côté d'un cube; si par l'effet de la chaleur ce côté devient $1 + d$, le cube deviendra $1 + 3d + 3d^2 + d^3$; mais il se réduira à $1 + 3d$, car, d étant une fraction très petite, $3d^2 + d^3$ peut être négligé, de sorte que la dilatation totale du cube sera $3d$, c'est-à-dire triple de la dilatation linéaire.

La dilatation absolue du mercure et celle du verre étant connues, il est facile de déterminer la dilatation cubique des autres corps; par exemple, s'agit-il d'avoir la dilatation du fer, on introduit un petit cylindre de ce métal dans un tube de verre qu'on effile à la lampe et qu'on remplit de mercure; on chauffe ce dernier jusqu'à l'ébullition, afin de chasser l'air et l'humidité. En pesant le tube rempli à zéro, l'exposant ensuite à différentes températures, et pesant le mercure expulsé à chaque expérience, on a la dilatation du fer pour les différentes températures, car le volume sorti est égal à la somme des dilatations du fer et du mercure, diminuée de la dilatation du verre. Pour exécuter ce calcul, il faut connaître le volume de chacun des corps, ce qui s'obtient en divisant les poids par les densités à zéro. La capacité du tube est égale à la somme des volumes du fer et du mercure (1).

Si le métal pouvait être altéré par le mercure, on l'oxiderait légèrement à la surface, ou on le couvrirait d'une couche très mince de vernis. La couche d'oxide ou de vernis n'aurait qu'un poids inappréciable, comparativement au poids total, et serait conséquemment sans influence sur le résultat final.

110. Les coefficiens fournis pour le verre, le platine, le cuivre et le fer, prouvent que la dilatation des solides, rapportée au thermomètre à air, est *croissante*, et qu'elle l'est *inégalement* pour chacun d'eux. Si l'on construisait des thermomètres avec des règles de ces corps, et si on les graduait à la manière ordinaire, ils donneraient au delà de cent degrés des températures beaucoup plus élevées que celles qu'indique le thermomètre à air. On tire des tableaux ci-dessus les rapports suivans :

Thermomètre à air.	Fer.	Cuivre.	Platine.	Verre.
0	0	0	0	0
100°	100.	100°	100°	100°
300°	372°,6	328°,8	311°,6	352°,9 (2).

On voit 1° que les indications du thermomètre en platine seraient les plus rapprochées de celles du thermomètre à air;

(1) Soient V, V', V'' le volume du fer, du mercure, et la capacité totale du tube; K, K' K'' les coefficiens de la dilatation du fer, du mercure et du verre; t la température comptée à partir de zéro. On aura $VKt + V'K't - V''K''t = m$. m étant le volume du mercure chassé par la dilatation. Ou si l'on exprime les volumes en fonctions des poids, la formule devient

$$\left(\frac{P}{D}K + \frac{P'}{D'}K' - \left(\frac{P}{D} + \frac{P'}{D'}\right)K''\right)t = \frac{P''}{D''} \text{ où}$$

tout est connu, à l'exception de K.

Dans cette question D et D' sont les densités à zéro, et D'' la densité à la température t.

(2) Si l'on appelle T la température du thermomètre à air, t la température correspondante du thermomètre

2° Que la dilatation du verre est très croissante, puisqu'à trois cents degrés du thermomètre à air, le thermomètre en verre marquerait 352°,9; voilà pourquoi notre thermomètre à mercure ne marque que 307°,64, quand le thermomètre à air est à 300°, tandis que le mercure pris isolément donnerait 314°,15, comme le prouve le tableau de la dilatation de ce métal.

111. D'après ce qui précède, il est visible qu'aucun thermomètre formé avec une substance solide ou liquide n'est comparable à lui-même, puisque la dilatation de ces substances va en croissant avec la température. La variation de la dilatation est en général d'autant plus grande que le corps est plus près de la température de son changement d'état. Si quelques substances ont un coefficient de dilatation constant, ce n'est peut-être que l'air, l'azote, l'oxigène et l'hydrogène, les seuls corps qu'on n'ait pu faire changer d'état par le froid ou la pression; d'après cela, c'est au thermomètre à air que doivent être rapportées les températures. Mais la construction plus facile et l'usage plus commode du thermomètre à mercure déterminent les physiciens à l'employer dans presque toutes les expériences. Il est donc nécessaire de comparer la marche de ces deux instrumens. Déjà M. Gay-Lussac a fait voir qu'ils sont d'accord entre la glace fondante et l'eau bouillante; MM. Dulong et Petit ont plus récemment poursuivi la même comparaison entre — 36° et + 350°. Voici les rapports obtenus.

Températures indiquées par le thermomètre à mercure.	Températures indiquées par le thermomètre à air, et corrigées de la dilatation du verre.
— 36°	— 36°
0°	0°
100°	100°
150°	148°,70
200°	197°,05
250°	245°,05
300°	292°,70
350°	350°

formé par une de ces substances, K et K' les coefficients de dilatation entre 0 et 100, et entre 0 et T, on a

$$K : K' :: T : t \ (a).$$

Dans le cas du fer, on a $K = \frac{1}{84600}$ entre 0 et 100°, et $K' = \frac{1}{68100}$ entre 0 et 300°, on trouve $t = 372°,6$.

En effet, chaque degré de l'échelle thermométrique équivaut à Kl, l étant la longueur de la règle de fer, puisqu'on suppose pour la construction de cette échelle K uniforme à toutes les températures. A la température T du thermomètre à air, la règle du thermomètre sera dilatée de $K'lT$. Pour avoir le degré correspondant t de ce thermomètre, il faut évidemment diviser $K'lT$ par Kl; ainsi l'on a $t = \frac{TK'}{K}$, d'où l'on déduit la proportion (a). Si au lieu d'une longueur on supposait un volume, on arriverait au même résultat.

On n'emploie pas dans cette comparaison le thermomètre ordinaire, parce qu'il faudrait donner une grande longueur à la tige pour que l'instrument indiquât les hautes températures avec une certaine approximation. On se sert du thermomètre à poids. Nous avons vu, n° 107, que la dilatation apparente du mercure est donnée par la formule $\frac{p}{(P-p)\,t} = d$; mais on sait que $d = \frac{1}{6480}$. L'expression précédente devient $\frac{p}{(P-p)\,t} = \frac{1}{6480}$.

On opérera donc comme si l'on voulait chercher la dilatation apparente et l'on obtiendra t.

A côté du tube rempli de mercure est un tube semblable rempli d'air sec et également ouvert; ces deux appareils sont à la même température puisqu'ils sont plongés dans le bain d'huile.

(Les calculs qu'exigent le thermomètre à air étant un peu compliqués, nous renvoyons le lecteur aux notes.)

Nota. Dans ce qui précède, nous avons supposé la température égale dans toutes les parties du corps soumis à l'expérience : quand la distribution de la température n'est pas uniforme, la dilatation de toutes les parties est déterminée par l'équilibre général des forces moléculaires que la chaleur a développées; il peut même arriver qu'il y ait contraction dans une partie échauffée. Voici une proposition à laquelle a été conduit M. Duhamel : l'on introduit une quantité quelconque de chaleur dans l'épaisseur d'une sphère creuse, de telle sorte que les points également éloignés du centre soient également échauffés; la dilatation de la capacité intérieure, ainsi que du volume extérieur, ne dépend que de la quantité totale et nullement de la distribution de la chaleur introduite; mais la dilatation des diverses couches comprises entre les deux couches extrêmes, dépend de cette distribution.

Pyromètres.

112. Quand les températures à déterminer surpassent 400 à 500 degrés, les vases en verre doivent être rejetés, vu qu'ils entrent en fusion à 500° à peu près. On substitue alors aux thermomètres ordinaires, des thermomètres formés par des corps solides peu fusibles. On appelle ces instrumens pyromètres.

Nous ne décrirons pas ici tous les *pyromètres* plus ou moins ingénieux, imaginés par les physiciens. Le grand nombre des parties de ces instrumens les rend en général fort imparfaits.

113. Le plus simple est celui qui porte le nom de pyromètre de Borda; il est formé par deux lames de métaux inégalement dilatables (*fig.* 103). Cet instrument laisse de l'incertitude sur les indications qu'il fournit aux températures supérieures à 350°, puisqu'au delà de ce terme la loi des dilatations des métaux est inconnue. Cependant, en tenant compte de l'accroissement du coefficient de dilatation, on obtiendrait, avec ce pyromètre, des températures plus exactes qu'avec aucun autre pyromètre connu. C'est un instrument composé d'une lame de cuivre et d'une lame de platine de la longueur de quatre mètres environ, et peu différent, par la forme, de celui que représente la *fig.* 103, que Borda et les autres astronomes français ont employé comme mesure linéaire, dans les grandes opérations géodésiques entreprises dans ces derniers temps.

Un autre pyromètre est encore fondé sur l'inégale dilatabilité de deux métaux; la *fig.* 76 le représente : $A\ C\ B$ est une tige de métal rectiligne; l'autre tige courbe $A\ D\ B$ est formée par un métal plus dilatable. Le changement de température fait varier la forme de l'arc $A\,B\,D$; on rend les variations sensibles par le moyen d'un levier coudé $F\ C\ L$, dont la marche est indiquée par un arc gradué pr. Cet instrument, connu sous le nom de pyromètre de Régnier, donne approximativement les basses et les hautes températures; mais cette complication de levier et de tiges de diverses sortes fait qu'il est peu susceptible d'exactitude.

Quoique les instrumens de ce genre n'offrent pas une assez grande précision pour qu'on puisse en regarder les indications comme très rigoureuses, cependant l'emploi en est quelquefois très utile. Par exemple, veut-on que la température d'une moufle ne dépasse pas certaines limites, on place dans ce four un de ces instrumens, et on dirige le feu de manière à ce que l'extrémité de la branche $C\ L$ du levier corresponde toujours à peu près à la même division de l'arc pr. M. Brongniart met ce procédé en usage à la belle manufacture de Sèvres.

114. Le pyromètre de Wedgwood, habile manufacturier anglais, diffère essentiellement de tous les autres pyromètres. La partie principale de cet instrument est un prisme d'argile. Cette substance prend un retrait d'autant plus grand qu'elle est soumise à une température plus élevée (1). On fait d'abord glisser le prisme d'argile entre deux règles métalliques $a\,b$ et $c\,d$ (*fig.* 74), divisées en parties égales et inclinées entre elles. La longueur commune de ces deux règles est 30 centimètres; la différence entre les distances de deux extrémités est environ de 3^{mm}; la distance moyenne est de 10^{mm}; chaque règle est divisée en 240 parties, chaque partie est un degré; le zéro est au niveau du plus grand écartement des règles; il correspond à peu près à 500° centigrades; chaque degré vaut 72 de-

(1) Il ne faut pas voir dans cette contraction de l'argile par la chaleur, une contradiction à la loi commune des dilatations des corps. Ce phénomène tient à une combinaison plus intime des élémens; et lorsque la chaleur a été assez forte pour que la combinaison soit complète, l'argile suit la loi générale, elle se dilate par la chaleur et se contracte par le froid.

grés centigrades. Souvent, afin de rendre l'instrument plus portatif, on le partage en deux.

Le pyromètre de Wedgwood est nécessairement très défectueux; il n'est propre qu'à donner un faible aperçu des températures.

On a trouvé que

		Wedgwood.		En degrés centigrades.
L'argent fond	à	28°	ou	2516
L'or	à	32°		2804
Le fer	à	150°		11300

Nous ne rapportons aucun autre nombre, parce que nous pensons que toutes les indications du même instrument sont tout-à-fait inexactes et qu'elles sont en général beaucoup au-dessus de la vérité. Ainsi la température de la fusion du fer, une des plus hautes qu'on puisse produire, n'est peut-être pas 1500 degrés. Le pyromètre de Wedgwood la donne égale à 11300.

De tous les pyromètres, celui qui, dans l'état actuel de la science, nous paraîtrait mériter la préférence, serait le pyromètre à air, construit avec une boule creuse de platine, à laquelle serait adapté un tube en verre : la dilatation du platine serait, il est vrai, une cause d'erreur ; mais comme la loi de cette dilatation est connue de 0 à 360°, on pourrait, par le calcul, l'étendre jusqu'à 500, 600 degrés et plus, et affaiblir ainsi considérablement l'erreur.

M. Prinsep de Benarès vient de faire des essais avec un appareil à la vérité très compliqué; il donne 649° pour la chaleur rouge, 899° pour la chaleur orange, 999° pour la fusion de l'argent.

L'importance de la connaissance des dilatations a été assez démontrée par la comparaison que nous avons faite des différens thermomètres; il ne nous reste plus qu'à citer quelques applications aux arts.

Pendules compensateurs.

115. On sait que la dilatation et la contraction des métaux opérées par les variations de température, sont les causes principales de l'irrégularité du mouvement des horloges. Si la verge du pendule s'allonge, l'horloge retarde; elle avance dans le cas contraire. On peut combiner les diverses parties de la tige de manière à compenser les effets de la chaleur et du froid.

116. Le pendule employé généralement aujourd'hui en France a la forme qu'indique la *fig.* 97. La verge de ce pendule est formée de deux métaux, de fer et de cuivre; la dilatation des tiges de fer tend à augmenter la longueur du pendule, la contraction à la diminuer ; les tiges de cuivre, comme le fait voir la figure, produisent un effet opposé. Par le calcul, on sait que les longueurs totales des tiges doivent être en raison inverse des dilatations linéaires des deux métaux; on satisfait d'abord approximativement à cette première condition, ensuite on achève la compensation par tâtonnement, en portant le pendule à différentes températures, depuis celle de la glace fondante jusqu'à celle de l'eau bouillante (1).

117. Graham, célèbre horloger anglais, avait proposé de former la tige du pendule avec un tube de verre que l'on remplirait en partie de mercure. Comme la dilatation de ce métal est beaucoup plus grande que celle du verre, une quantité peu considérable suffirait pour compenser les changemens de la longueur du tube de verre ; la *fig.* 98 représente ce pendule compensateur. Le centre d'oscillation de toute la masse de ce pendule est dans la colonne du mercure, parce que le poids en surpasse de beaucoup celui du tube. Par l'élévation de température, la dilatation du tube fait baisser ce centre, mais celle du mercure l'élève. Un pendule bien compensé peut être établi de cette manière (2). Il n'est pas en usage en France.

118. On voit dans la *fig.* 99 un appareil de compensation imaginé, en 1738, par Julien Leroi, horloger français. Sur un support horisontal CC repose un tuyau AB de laiton; au sommet A de ce tuyau est fixée l'extrémité d'une verge de fer AEG. Cette tige est interrompue en $h\,k$, où elle est composée d'un petit châssis $h\,k$, formé de deux lames flexibles ; ce châssis passe dans la fente $p\,q$, faite dans le support CC. La longueur de la tige

(1) Supposons que les longueurs de AC, DB, EF barres de fer, et de KH barre de cuivre (*fig.* 96) soient représentées par a, b, c et d, on aura pour la longueur réelle du pendule

$$L = a + b + c - d.$$

Supposons de plus que le pendule ait à zéro la longueur convenable pour faire une oscillation par seconde : à une température t, L deviendra

$$L' = a + aKt + b + bKt + c + cKt - d - dK't.$$

Pour que $L' = L$, on aura $(a + b + c)\,K = dK'$, ou $(L + d)\,K = d\,K'$. D'où si $K' = \frac{5}{3}$ de K, on aura $d = \frac{3}{2}\,L$, c'est-à-dire que la somme des tiges en cuivre doit être égale à une fois et demie la longueur du pendule; condition évidemment impossible à remplir avec un appareil semblable à celui qui est représenté dans la *fig.* 96, mais à laquelle on peut satisfaire avec l'appareil représenté dans la *fig.* 97.

(2) Soit L la longueur de la tige, K le coefficient de la dilatation linéaire, LK sera l'allongement de la tige.

Soit h la hauteur de la colonne de mercure, le centre de gravité sera à $\frac{h}{2}$. Si K' est le coefficient de la dilatation apparente, le centre montera de $K'\frac{h}{2}$. Ainsi pour la compensation il faudra $LK = K'\frac{h}{2}$.

du pendule est donc réellement $G B$; par cette disposition, la dilatation du tuyau tend à faire monter la lentille G, tandis que la dilatation de la tige tend à la faire descendre (1). Ce moyen de compensation a été abandonné, parce qu'il augmente inutilement le volume des horloges.

119. Un habile horloger de Paris, M. H. Robert, a imaginé récemment un moyen de compensation fort simple. Ce moyen consiste à former la tige du pendule en platine, et la lentille en zinc. Le premier métal est moins dilatable que le second. Le principe est le même que celui du pendule de Graham. On aura donc l'équation $L K = \frac{l}{2} K'$; L étant la longueur de la tige en platine, l celle de la lentille en zinc, et K et K' les coefficiens de la dilatation linéaire. Il est bien entendu que la tige traverse la lentille sans y être soudée.

120. C'est encore en opposant la dilatation à elle-même qu'on est parvenu a donner au mouvement des chronomètres une constance et une régularité presque parfaites.

On emploie, dans ce dernier moyen de compensation, des lames doubles. Voici quelques détails sur ces espèces de lames.

Soit une lame rectiligne (*fig.* 100) formée d'une lame de cuivre $A B$ et d'une lame de platine $C D$. Supposons qu'au moyen de vis, on les lie l'une à l'autre d'une manière invariable, à une température déterminée. Cette lame composée se courbera par le plus petit changement de température. Par l'élévation de la température, elle se courbera de manière que la lame de cuivre, plus dilatable et par conséquent devenue plus grande que celle de platine, embrassera celle-ci dans sa concavité (*fig.* 101); le contraire aura lieu par l'abaissement de la température (*fig.* 102).

On conçoit maintenant que, si l'on dispose transversalement à la tige d'un pendule une pareille lame, portant une petite masse à chacune de ses extrémités, on pourra combiner la longueur de la lame et le poids des masses, de manière que la distance entre le point de suspension et le centre d'oscillation du système soit constante (*fig.* 104). MM. Biot et Mathieu ont suivi une horloge dont le pendule était ainsi compensé, et lui ont trouvé une grande régularité.

121. Dans les montres, le régulateur du mouvement est un balancier circulaire $A B C$ (*fig.* 104 *bis*), mu par un ressort spiral RR' qui, en se resserrant et en se débandant, fait tourner le balancier alternativement sur lui-même : si la température change, la force du ressort, les dimensions du balancier et du ressort changent aussi, et par suite la montre avance ou retarde. C'est pour éviter cet inconvénient qu'on a fixé au balancier des lames compensatrices P et P', terminées par des masses en or; à force d'essais faits à des températures différentes, on finit par établir une compensation complète.

122. MM. Breguet, dont les chronomètres sont si justement renommés dans toute l'Europe, ont fait une heureuse application des lames compensatrices à la construction d'un thermomètre qui jouit d'une extrême sensibilité.

La partie principale de cet instrument est une hélice (*fig.* 108), formée de trois lames très minces de métaux inégalement dilatables, réunies par pression à une haute température; les trois lames superposées, d'argent, d'or et de platine, ne forment ensemble qu'une épaisseur de 1/50 de millimètre. L'hélice est fixée par le haut à un support en laiton, qui, par sa forme, la laisse dans un isolement parfait; l'extrémité inférieure porte une aiguille horizontale équilibrée par un poids; cette hélice, composée de métaux qui diffèrent par leur dilatabilité, doit se tordre ou se détordre, suivant la variation de la température, et entraîner dans son mouvement l'aiguille qui parcourt les divisions d'un cercle horizontal. Ce cercle est évidé dans le centre, afin que l'air n'éprouve aucun obstacle à se renouveler autour de l'hélice.

Il suffirait, à la rigueur, dans la construction de l'hélice, de superposer deux métaux, le platine et l'argent, par exemple; mais comme une semblable lame éprouve des déchiremens dans les changemens brusques de température, MM. Breguet ont placé, entre le platine et l'argent, un troisième métal, l'or, d'une dilatabilité moyenne.

On connaît la valeur de chaque degré en comparant la marche de cet instrument à celle d'un bon thermomètre à mercure. L'expérience prouve que l'aiguille, pour des changemens égaux de température, parcourt des arcs égaux; de sorte que l'instrument est comparable à lui-même et aux autres instrumens construits d'après les mêmes principes. On jugera par l'expérience suivante de l'extrême sensibilité de ce thermomètre métallique. MM. Breguet le placèrent sous un récipient de cinq litres de capacité, à la température de 19 degrés centigrades : ils firent le vide aussi promptement que possible; le thermomètre à mercure ne descendit que de 2 degrés, tandis que l'aiguille de l'hélice passa de + 19° à — 4° centigrades. Ils laissèrent ensuite entrer l'air; l'index alla jusqu'à + 50° cen-

(1) Admettons que cet appareil ait à une certaine température, à zéro, par exemple, les dimensions convenables. Soient a la longueur du tuyau AB, b la longueur totale AG, et l la longueur BG qu'on veut rendre invariable; on aura $l = b - a$. A une température t, si f et c sont les coefficiens de la dilatation linéaire du fer et du cuivre, on aura $l' = b(1 + ft) - a(1 + ct)$,

$$= b - a + bft - act$$

et comme il faut que $l' = l$, on aura $bf = ac$. C'est-à-dire que les longueurs du tuyau de cuivre et de la tige de fer doivent, pour la compensation, être en raison inverse des dilatations linéaires de ces deux métaux; ce qu'on aurait trouvé par le raisonnement.

tigrades, tandis que le thermomètre à mercure descendait encore un peu, tant il avait mis de lenteur à prendre la température de l'air raréfié. Cette sensibilité, déjà très grande, peut être portée encore plus loin, en agrandissant les dimensions de l'hélice, sans en augmenter la masse. (*Ann. de Chim. et de Phys.*, t. 5.)

L'avantage principal de cet instrument n'est pas dans la sensibilité, mais dans la promptitude de ses indications : on peut rendre beaucoup plus sensibles de simples thermomètres à mercure, mais il est impossible de leur donner la dixième partie de sa promptitude à prendre la température des milieux.

La forme indiquée dans la *fig.* 108 est la plus commune ; mais au lieu de tourner la lame en hélice, on pourrait lui donner la forme d'une spirale, comme le représente la *fig.* 115 *bis*, ou enfin celle qu'indique la *fig.* 105.

123. La force avec laquelle les corps solides ou liquides tendent à se dilater ou à se contracter par l'élévation ou l'abaissement de température est très grande.

M. Molard a fait une heureuse application de la dilatation au Conservatoire des arts et métiers. Deux murs d'une galerie s'étaient inclinés par le poids du plafond qu'ils soutenaient. M. Molard les fit traverser par des barres en fer terminées à l'extérieur par des boulons ; il les fit chauffer plusieurs fois, en ayant soin à chaque fois de serrer les boulons par des écrous. Après chaque échauffement, les barres s'étant dilatées, les écrous pouvaient être serrés ; mais après le refroidissement, la contraction des barres faisait rapprocher les murs, qui bientôt furent remis dans leur verticalité première.

Capacités des Corps pour la chaleur.

124. Dans l'état actuel de la science, on ignore complètement les quantités absolues de chaleur renfermées dans les corps ; on n'en connaît pas même les rapports. Tout ce que les recherches des physiciens ont appris sur ce sujet se borne à la connaissance du rapport des quantités de chaleur nécessaires pour que les principaux corps, pris sous le même poids, varient d'un nombre déterminé de degrés de l'échelle thermométrique. *La Capacité* d'un corps pour la chaleur ou *la chaleur spécifique* est la quantité de chaleur qu'exige ce corps pris sous *l'unité* de poids pour varier de *l'unité* de température.

Pour donner une idée de l'influence de la chaleur spécifique dans les expériences, il suffira de citer un exemple. Si l'on mêle un kilogramme d'eau à zéro avec un kilogramme de fer à 11°, le mélange marque 1 degré, ce qui fait voir que la chaleur qu'abandonne le fer et qui fait baisser la température de ce métal de 10 degrés, n'élève la température de l'eau que d'un seul degré.

Le docteur Wilke paraît être le premier qui ait introduit dans la science le nom de chaleur spécifique. Ses expériences datent de 1781. Son calorimètre était un morceau de glace, dans lequel on pratiquait une cavité cylindrique, laquelle était fermée par un morceau de glace. Si l'on pouvait facilement se procurer de la glace sans fissures cette méthode serait très exacte.

Il existe trois méthodes par le moyen desquelles on parvient à connaître les chaleurs spécifiques ; nous les exposerons successivement.

125. *La première méthode* est due à MM. Lavoisier et Laplace.

Le calorimètre (*fig.* 127) de ces savans célèbres est très simple. Il consiste en trois cavités circulaires et concentriques. L'une, qui occupe le centre, est destinée à renfermer le corps dont on désire connaître la chaleur spécifique ; l'autre est remplie de glace, dont le corps fond une partie en se refroidissant ; la troisième, la plus extérieure, est aussi remplie de glace et défend celle qui entoure immédiatement le corps de l'action de l'air environnant : ainsi l'air qui s'introduit dans le calorimètre arrive dans la seconde cavité à la température zéro, puisqu'il a pris la température de la glace extérieure. On reçoit dans un vase particulier l'eau provenant de la glace fondue par le corps.

Ce procédé est fondé sur ce qu'un poids déterminé de glace pris à zéro, exige pour se fondre la quantité de chaleur qu'abandonne un pareil poids d'eau pris à 75°, en se refroidissant jusqu'à zéro. Si donc on porte à 75° des corps différens et de même poids, et qu'on les place successivement dans la petite cage *C* en fil de fer, les quantités de glace fondue, comparées à celle que fond une même masse d'eau prise à la même température, représenteront les chaleurs spécifiques. Il faut avoir l'attention, quand on emploie ce procédé, de laisser au moins pendant dix heures les corps dans le calorimètre, afin d'être bien certain de les refroidir jusqu'à la température de la glace.

Les corps liquides, et ceux qui exercent une action chimique sur la glace, comme les acides, les sels, les alcalis, doivent être renfermés dans un vase qu'on a soumis à une expérience préliminaire pour connaître la glace qu'il fond seul.

Si les corps n'avaient pas tous le même poids et la même température 75°, on ramènerait facilement les résultats à la même unité de poids et à la même température 75° (1).

(1) Si g est le poids de la glace fondue par un corps dont le poids est p, et la température t, $\frac{g}{t \times p}$ sera le poids de la glace fondue par ce même corps ramené à l'unité de poids et à l'unité de température. Si l'on voulait le résultat rapporté à la capacité de l'eau 5°, on multiplierait par 75.

Tableau des Capacités déterminées au moyen du calorimètre de glace, par MM. Lavoisier et Laplace.

Eau.	1,0000
Soufre.	0,2085
Fer battu.	0,1105
Étain.	0,0475
Plomb.	0,0283
Mercure.	0,0290
Oxide rouge de mercure.	0,0501
Minium.	0,0623
Chaux vive.	0,2169
Verre sans plomb.	0,1929
Acide nitrique, d^{té} = 1,298.	0,6614
Acide sulfurique, d^{té} = 1,87.	0,3346
Solution de nitre. { nitre 1, eau 8 }	0,8187
Huile d'olive.	0,3096

Le calorimètre est un instrument ingénieux; les résultats qu'il fournit sont assez exacts ; cependant on doit préférer, ou la méthode des mélanges, ou celle du refroidissement. La longue durée de l'expérience, et la nécessité d'avoir une quantité considérable de glace, sont des conditions que n'exigent pas les deux autres méthodes.

Méthode des Mélanges.

126. Cette méthode est généralement attribuée au physicien anglais Crawford, à qui la science doit un ouvrage sur la chaleur (*on animal heat*). Cette méthode, dont le célèbre Black avait parlé dans ses leçons, vers 1760, s'était probablement déjà présentée à l'esprit d'autres observateurs. Elle consiste à mélanger deux corps pris à des températures différentes : l'eau est ordinairement le corps froid. Si les corps ont la même masse, il est visible que les chaleurs spécifiques sont en raison inverse des variations de température; car si le fer, dans l'exemple cité au commencement de l'article 124, a perdu 10 degrés de température en abandonnant une quantité de chaleur qui n'a fait varier la température de l'eau que d'un seul degré, nécessairement la quantité de chaleur qu'exigerait une masse de ce liquide pour varier d'un nombre déterminé de degrés, serait dix fois plus grande que celle dont une même masse de fer aurait besoin pour que la température en changeât du même nombre de degrés. Il est sous-entendu que la variation de température n'estpas assez grande pour que la capacité change. (On verra plus loin que cet élément augmente avec la température.)

127. Comme on ne prend pas en général les corps sous le même poids, nous allons indiquer comment on peut résoudre la question, quels que soient les poids employés.

Soient, M la masse, C la capacité, t la température de l'eau froide, m la masse, T' la température, C' la capacité du corps chaud, et T'' la température du mélange. La température de l'eau s'est élevée de $T''-t$; la quantité de chaleur absorbée par ce liquide peut être exprimée par $MC(T''-t)$; car il est clair qu'un corps exige pour varier d'un certain nombre de degrés, une quantité de chaleur proportionnelle au produit de sa masse par sa capacité et par le changement de température ; en effet, si le corps avait une masse égale à l'unité et variait d'un degré, la quantité de chaleur serait C, pour l'intervalle de température $T''-t$; elle deviendrait $C(T''-t)$ et $MC(T''-t)$ pour la masse M. La perte de chaleur éprouvée par le corps chaud sera aussi représentée par $mC'(T-T')$; or, le gain égale la perte. On aura donc l'équation $MC(T''-t) = mC'(T-T')$, d'où l'on tire $\frac{C'}{C} = \frac{M(T''-t)}{m(T-T')}$. Comme le second membre ne renferme que des quantités connues par l'expérience, on trouvera facilement le rapport $\frac{C'}{C}$; et enfin C', si C est égal à l'unité comme on a coutume de le supposer : les capacités des corps seront alors comparées à celle de l'eau prise pour unité. Le vase qui renferme l'eau exerce une influence proportionnelle à sa masse p et à sa capacité C'', en sorte que dans l'application il faut remplacer M par $M + pC'$, C étant égal à 1.

Exemple : 8521$^{gr.}$, 25 de fer à la température de 55°,42 mélangés avec 25421$^{gr.}$, 18 d'eau à 15°,17 ont élevé la température de ce liquide à 16°,59.

L'eau est renfermée dans une caisse en cuivre très mince, du poids de 1377$^{gr.}$,3; ces 1377$^{gr.}$,3 équivalent à une masse d'eau égale à 1377$^{gr.}$,3 × 0,0095 ou à 130$^{gr.}$,8 d'eau, 0,095 étant la capacité du cuivre. Ainsi la masse totale d'eau échauffée est 25552$^{gr.}$. En remplaçant les lettres M, m, T', t, T'' par leurs valeurs on trouve 0,110 pour la capacité du fer.

128. Si on voulait, par la méthode des mélanges, connaître la capacité d'un liquide ou d'un corps qui eût de l'action chimique sur l'eau, on renfermerait ce corps dans un vase dont il faudrait tenir compte. Si, par exemple, le vase pesait p' et avait une capacité égale à c, il serait équivalent $p'c$ d'eau, de sorte que ce que nous avons représenté dans la formule par mC' serait réellement $p'c + mC'$ (1).

Il est plusieurs précautions à prendre pour assurer l'exactitude des opérations. On rend la masse de la caisse qui renferme l'eau froide aussi petite que possible; on n'opère qu'à des températures assez basses pour que l'évaporation de l'eau, pro-

(1) La formule générale serait $(MC+pC'')(T''-t) = (mC' + p'c)(T-T')$.

duite par l'immersion d'un corps très chaud, ne soit pas une cause d'erreur; enfin, on observe le refroidissement de l'appareil, afin d'établir la correction de la perte de chaleur faite pendant l'expérience (1). En remplissant ces conditions, la méthode des mélanges est exacte et commode dans beaucoup de circonstances. Nous ferons remarquer que cette méthode se suffit à elle-même comme chacune des deux autres méthodes.

Méthode du Refroidissement.

129. Cette troisième méthode est fondée sur l'observation des temps qu'emploient les différens corps pris sous le même volume, et portés à la même température pour se refroidir d'un égal nombre de degrés. Il faut avoir l'attention de donner à tous les corps la même surface rayonnante. Si les corps sont liquides ou pulvérisés, on les renferme successivement dans un même vase très mince. On fait ordinairement usage d'un vase en argent ou en cuivre. Si l'on veut comparer les chaleurs spécifiques des deux corps solides, du fer et de l'étain, par exemple, on peut former avec ces substances des cylindres égaux en volume, et observer les temps du refroidissement; et comme deux métaux, même très polis, ont des pouvoirs rayonnans inégaux, il faut absolument leur donner la même surface. On y parvient de la manière suivante, comme je l'ai fait, je crois, le premier. On observe d'abord le refroidissement des deux cylindres suspendus dans l'air par des fils de soie; on note ces temps; on couvre les cylindres d'une couche de vernis; on observe de nouveau les temps, et ainsi de suite, jusqu'à ce que l'application d'une nouvelle couche ne change pas la durée du refroidissement. Maintenant il doit sortir de chacun des deux corps la même quantité de chaleur dans le même temps, puisque la surface rayonnante, l'excès de la température sur celle du milieu environnant, le volume, tout est pareil de part et d'autre; les quantités totales de chaleur qu'auront abandonnées les deux corps seront donc dans le rapport des temps. Or, pour un intervalle donné de température, la quantité de chaleur qu'abandonne un corps est proportionnelle à sa masse et à sa chaleur spécifique; donc, si m et m' désignent les masses, c et c' les chaleurs spécifiques, θ et θ' les temps du refroidissement, $T-t$ l'abaissement de température, on aura $mc\,(T-t)$, et $m'c'\,(T-t)$ pour les expressions des quantités de chaleur perdues, et conséquemment $mc : m'c' :: \theta : \theta'$.

(1) Il nous paraît beaucoup plus exact de faire la correction de cette manière que de suivre la méthode proposée par Rumford, et vantée à tort, selon nous, dans beaucoup d'ouvrages.

Résultats du refroidissement après l'application des couches.

Polis.	Fer.	9',56''
	Etain	4',37''
1re couche.	Fer.	6',44''
	Etain. . . .	2',43''
2e couche.	Fer.	5',40''
	Etain. . . .	2',37''
3e couche.	Fer.	5',40''
	Etain. . . .	2',37''

Par l'application de la seconde couche de vernis pour les deux métaux, le rayonnement a été porté au maximum : les temps du refroidissement sont 5',40'' et 2',37''. Puisque les deux corps ont le même volume, il est permis de substituer les densités aux masses; les densités sont 7,788 et 7,291. En faisant les substitutions, on obtient 100 à 49,32 pour le rapport de la capacité du fer à celle de l'étain.

Pour rapporter la capacité des corps à celles de l'eau, on introduit successivement ce liquide et les corps réduits en poudre ou en limaille dans un même vase métallique très mince, dont on tient nécessairement compte. Si p est le poids, et c'' la capacité de ce vase, les quantités de chaleur perdues pendant les temps θ et θ' seront proportionnelles à $pc'' + mc$ et à $pc'' + m'c'$, de sorte qu'on aura $pc'' + mc : pc'' + m'c' :: \theta : \theta'$. Nous ferons l'application de cette formule à la détermination de la capacité de l'huile d'olive comparée à la capacité de l'eau, que nous prendrons pour unité.

Les données de l'expérience sont : poids du vase d'argent 56g,36; capacité de ce métal 0,055.

Le vase contenait 147g,04 d'eau à une certaine température, et se refroidissait de 30°,2 en 21'; le même vase contenait 144g,04 d'huile d'olive à la même température, et perdait 30°,2 en 12', 12''. En mettant les valeurs numériques dans la proportion, on en déduit 0,58 pour la capacité de l'huile d'olive (1).

Tableau des Capacités déterminées par la méthode du refroidissement.

Eau		1,000	
Vinaigre		0,9200	*D.*
Acide nitrique	(dté 1,30)	0,66	*D.*
Acide hydrochlorique	(dté 1,153)	0,60	*D.*
Acide sulfurique	(dté 1,84)	0,35	*D.*
Alcool	(dté 0,817)	0,70	*D.*
	(dté 0,793)	0,622	+

(1) Il est possible que cette capacité ne soit pas parfaitement exacte, l'expérience n'a été faite qu'une fois : on n'a voulu d'ailleurs que fournir une application numérique.

Éther sulfurique	(dt 0,70)	0,66	D.
	(dt 0,715)	0,522	+
Essence de térébenthine	(dt 0,872)	0,462	+
Bois de pin		0,65	M.
— de chêne		0,57	M.
— de poirier		0,30	M.
Flint glass		0,19	D.
Chlorure de sodium		0,23	D.

(D. Dalton, + Despretz, M. Meyer.)

MM. Dulong et Petit ont cherché, en suivant la méthode du refroidissement, les capacités des principaux métaux et du soufre. Les résultats de leurs recherches sont :

Eau	1,0000	Argent	0,0557	Fer	0,1100
Bismuth	0,0288	Zinc	0,0927	Cobalt	0,1498
Plomb	0,0298	Tellure	0,0912	Soufre	0,1880
Or	0,0296	Cuivre	0,0949		
Platine	0,0314	Nickel	0,1035		
Etain	0,0314				

Les auteurs de ces recherches ont fait une remarque importante, c'est que *le produit de la capacité d'un corps simple par le poids de son atome donne un nombre constant*, et très peu différent de 0,375. Il suit de là que *les capacités des corps simples pour la chaleur sont en raison inverse des poids des atomes*. Les résultats des expériences de MM. Laroche et Bérard sur les gaz satisfont encore assez bien à cette loi. Si cette loi était vraie à toutes les températures, il faudrait que la loi de l'accroissement de la capacité par la température fût la même pour tous les corps.

130. On peut se demander maintenant si les chaleurs spécifiques sont les mêmes à toutes les températures, ou si elles sont variables : l'hypothèse qui admet que la capacité des corps augmente avec l'élévation de température est la plus probable. Telle était aussi l'opinion de Dalton; des expériences de MM. Dulong et Petit qui ne laissent rien à désirer, ont établi le fait *de l'accroissement de la chaleur spécifique* d'une manière incontestable. Dans ces expériences chaque corps était porté successivement à diverses températures et plongé dans une masse connue d'eau froide. On déterminait la capacité du métal à chaque expérience par la méthode des mélanges. La masse de liquide était assez considérable pour que la variation de température n'en surpassât pas 10 à 15 degrés, intervalle dans lequel la capacité de l'eau ainsi que celle de tout autre corps peut être considérée comme constante. On aura une idée de l'augmentation de la capacité par la seule inspection du tableau des résultats.

	Capacités moyennes entre 0 et 100°.	Capacités moyennes entre 0 et 300°.
Mercure	0,0330	0,0350
Zinc	0,0927	0,1015
Antimoine	0,0507	0,0547
Argent	0,0557	0,0611
Cuivre	0,0940	0,1013
Platine	0,0335	0,355
Verre	0,177	0,190

Résultats particuliers fournis par le fer.

Capacité moyenne entre 0 et 100° = 0,1098
0 à 200° = 0,1150
0 à 300° = 0,1218
0 à 350° = 0,1255

Chaleurs spécifiques des Gaz.

131. La détermination des chaleurs spécifiques des gaz présente beaucoup de difficultés. Aussi les essais des différens physiciens n'ont-ils donné que des résultats peu concordans. Le travail de MM. Laroche et Bérard se distingue par son étendue et par le soin que les auteurs ont mis dans leurs expériences. Cependant il laisse beaucoup à désirer. En voici les principaux résultats :

RÉSULTATS.

Chaleurs spécifiques des principaux Gaz.

	A volumes égaux.	A poids égaux.
Air atmosphérique.	1,0000	1,000
Hydrogène	0,9033	12,3401
Oxigène	0,9765	0,8848
Azote	1,000	1,0318
Acide carbonique	1,2588	0,8280
Oxide d'azote	1,3503	0,8878
Oxide de carbone	1,0340	1,0805
Gaz oléfiant	1,5530	1,5763
Vapeur aqueuse	1,960	3,1560

MM. Laroche et Bérard ont obtenu ces déterminations en faisant passer des volumes égaux de différens gaz dans un serpentin métallique entouré d'une quantité connue d'eau froide; c'est cet appareil que nous appellerons calorimètre. Chaque gaz, en sortant du gazomètre, traverse un premier serpentin enveloppé d'huile ou d'eau chaude. Le gaz arrive dans le calorimètre et y dépose une partie de sa chaleur; la température du calorimètre s'élève, et elle atteint son maximum quand cet instrument perd, par le contact de l'air et par le rayonnement, une quantité de chaleur égale à celle qu'il reçoit du gaz. On conçoit que ce maximum doit nécessairement arriver, puisque le gaz cède au calorimètre une quantité constante de chaleur et que la perte que fait cet instrument va en croissant : or, comme on sait (*voy.* les *Lois du refroidissement*) que la perte de chaleur qu'éprouve un corps placé dans cette circonstance est proportionnelle à l'excès de sa température sur la température de l'espace environnant, et comme d'ailleurs le gaz, en passant dans le calorimètre, lui transmet la chaleur que celui-ci perd, il s'ensuit que la quantité de chaleur qu'abandonne le gaz est

aussi proportionnelle à l'excès de la température du calorimètre sur celle du milieu (1).

132. Les mêmes physiciens ont comparé les chaleurs spécifiques des gaz à l'eau sous le même poids, et ont trouvé :

Eau	1,0000	Hydrogène	3,2936
Air	0,2669	Oxide d'azote	0,2369
Oxigène	0,2361	Gaz oléfiant	0,4207
Azote	0,2734	Oxide de carbone	0,2884
Acide carbonique	0,2210	Vapeur aqueuse	0,8470

Pour déterminer ces derniers rapports, MM. Laroche et Bérard ont fait passer un courant de gaz à travers un calorimètre contenant une quantité d'eau connue. La température de ce liquide était d'abord abaissée au-dessous de la température du milieu environnant, et l'expérience était arrêtée quand le gaz avait porté cette température autant au-dessus du milieu environnant qu'elle était d'abord au-dessous. Ce mode de correction nous paraît défectueux; il vaudrait mieux prendre l'eau à la température des corps environnans, comme nous l'avons déjà fait remarquer.

Soient m et c la masse et la capacité de l'eau; t la température de ce liquide au commencement de l'expérience, et t' la température à la fin; m', x et T la masse, la capacité et la température du gaz chaud; soient enfin p et c' le poids et la capacité du calorimètre, on aura

$$m\,c\,(t'-t)+p\,c'\,(t'-t)=m'x\left(T-\frac{t+t'}{2}\right)$$

Le courant de gaz étant uniforme, $\frac{t+t'}{2}$ représente la température moyenne que conserve le gaz à sa sortie du calorimètre.

133. M. W. T. Haycraft, par suite d'expériences faites sur des gaz desséchés, a attribué la même capacité aux gaz simples ou composés pris sous le même volume et la même pression. MM. Dulong et Petit, après l'examen des expériences de MM. Laroche et Bérard, avaient admis la même loi pour les gaz simples seulement; des expériences récentes de M. Dulong montrent que chaque gaz composé a une capacité particulière.

MM. A. Larive et F. Marcet (*An. de Ch. et de Phys.*, t. 35, p. 1) ont obtenu les mêmes résultats que M. Haycraft.

Le procédé des physiciens genevois consiste à exposer pendant un même temps des volumes égaux de différens gaz à une source de chaleur égale.

L'appareil est représenté dans la *fig.* 97 *bis*. Ce n'est au fond qu'un manomètre comme on va le voir. Un tube *DEFC* recourbé en forme de siphon porte un petit ballon *A*. Deux robinets *B* et *C* permettent de séparer le ballon du tube sans que ni l'un ni l'autre communique avec l'air extérieur.

On remplit le ballon du gaz sur lequel on veut expérimenter. On donne à ce gaz une élasticité moindre que la pression extérieure; par exemple $0^m,63$; en sorte que le mercure s'élève dans le tube *DE* de 8 à 10 centimètres.

Une légère variation dans la température fait baisser la colonne du mercure, et comme on connaît la loi qui lie l'élasticité à la température, il sera facile de déterminer celle-ci d'après la hauteur du mercure. La température est ainsi indiquée par le gaz lui-même sans le secours d'aucun thermomètre.

Le petit ballon *A* est renfermé dans un autre ballon en cuivre, dont les parois sont couvertes de noir de fumée. On fait le vide dans ce second ballon jusqu'à 3 millim.

On plonge d'abord le ballon en cuivre dans un bain d'eau à 20°, et l'on note le point où s'arrête le mercure dans le tube *DE*. On le refroidit ensuite à l'aide d'un peu d'eau froide, et enfin on le plonge dans un bain à 30°. On note exactement l'instant où le petit ballon a acquis la température 20°, instant qui est indiqué par l'arrivée du mercure à l'endroit où il s'est arrêté dans le bain à 20°. On note de nouveau quand le ballon a acquis la température du bain, c'est-à-dire quand le mercure cesse de descendre.

En faisant ces expériences, MM. Larive et Marcet ont reconnu que, quel que soit le gaz qui remplit le ballon, le temps pour arriver à une même température est le même. Comme le ballon en cuivre envoie au petit ballon en verre la même quantité de chaleur dans le même temps, il faut nécessairement que *tous les gaz possèdent la même capacité*, sous le même volume, puisqu'ils éprouvent une égale variation de température par l'absorption d'une égale quantité de chaleur. Cette conséquence serait rigoureuse si la chaleur absorbée par le gaz n'était pas une *fraction très petite* de celle que prend le ballon.

D'après quelques essais de MM. Laroche et Bé-

(1) Soient c, T la capacité et la température d'un des gaz;

c', t les quantités correspondantes pour l'autre gaz;

m et m' les masses de gaz transmises à travers le calorimètre pendant le même temps (T et t étant très peu différens);

θ la température du lieu des observations;

θ' la température maximum du calorimètre dans l'expérience du premier gaz;

θ'' la quantité analogue pour le deuxième gaz, on aura :

$$m\,c\,(T-\theta'):m'\,c')\,(t-\theta'')::\theta'-\theta:\theta''-\theta.$$

$m\,c\,(T-\theta)$ est la chaleur abandonnée par le premier gaz en se refroidissant de T à θ' : $m'\,c'\,(T-\theta'')$ est la quantité correspondante pour l'autre gaz.

Dans cette proportion tout est connu, à l'exception du rapport des capacités $\frac{c}{c'}$. On pourra donc l'en tirer, et si l'un des gaz est l'air, par exemple celui dont la capacité est c, on fera $c=1$, ce qui donnera la capacité de l'autre gaz rapportée à la capacité de l'air prise pour unité.

rard, la chaleur spécifique de l'air augmente avec la pression, mais dans un moindre rapport que cette dernière.

Rapport entre la capacité des gaz sous un volume constant et la capacité sous une pression constante.

134. Tout ce qui a été dit précédemment suppose les corps pris sous une pression constante. Les capacités ainsi obtenues sont nécessairement plus grandes que celles qu'on obtiendrait sous un volume constant, puisqu'il y a une certaine quantité de chaleur employée à la dilatation.

Il serait fort difficile d'avoir directement la capacité d'un gaz sous un volume constant, puisqu'il faudrait renfermer ce gaz dans un vase inextensible. Ce procédé ne comporterait pas d'ailleurs une grande exactitude, parce que la chaleur prise par le gaz dans l'expérience n'est qu'une partie très petite de celle que prend le vase.

c étant la capacité de l'air sous une pression constante, la quantité de chaleur qu'il faudra donner à une masse de ce fluide, égale à l'unité, et prise à la température t, pour que la température en varie de θ, est $c\,\theta$. Si maintenant on comprime le gaz de manière à le ramener à son volume primitif, la nouvelle température sera $t + \theta + \omega$; et quand il sera revenu à la température initiale, il aura perdu une quantité de chaleur égale à $c'(\theta + \omega)$. c' étant la capacité sous un volume constant, on aura évidemment $c\,\theta = c'\,\theta + c'\,\omega$,

$$\text{d'où } \frac{c}{c'} = 1 + \frac{\omega}{\theta}.$$

Pour déterminer le rapport $\frac{c}{c'}$, il suffit donc de connaître le dégagement de chaleur ω dû à la condensation nécessaire pour reporter à son volume primitif un gaz dilaté par une température θ. L'expérience suivante fournit ces deux quantités ω et θ.

Soit un ballon (*M*, *fig.* 119 *bis*) renfermant de l'air à la pression P', à la densité d' et à la température t. P' est un peu moindre que la pression extérieure P. On ouvre le ballon pour donner accès à l'air extérieur, et on le ferme quand la pression intérieure est égale à la pression extérieure, ce qui arrive quand le mercure dans le tube *AB*, communiquant avec le ballon, est à la même hauteur que dans la cuvette dans laquelle il plonge. L'air extérieur, en pénétrant dans le ballon, condense l'air qui s'y trouve, en élève la température et conséquemment l'élasticité. Soient P'' et d'' la pression et la densité du fluide intérieur, quand il a repris sa température première, qui est aussi celle des corps environnans.

En négligeant la petite quantité d'air entrée dans le ballon, on pourra considérer l'élévation de température comme résultant de la compression subite de la même masse d'air, ramenée de la densité d' à la densité d''.

L'accroissement de température ω a porté le gaz de l'élasticité P'' à l'élasticité P. Ainsi l'on aura

$$\frac{P}{P''} = \frac{1 + a(t + \omega)}{1 + at}, \text{ d'où } \omega = \frac{(P - P'')(1 + at)}{a\,P''},$$

θ étant l'accroissement de température pour que la densité de l'air sous une pression constante passe de d'' à d', on aura la relation

$$\frac{P'}{P''} = \frac{1 + a\,t}{1 + a(t + \theta)}; \text{ d'où } \theta = \frac{(P'' - P')(1 + at)}{P'\,a};$$

$$\text{d'où } \frac{c}{c'} = 1 + \frac{\omega}{\theta} = 1 + \frac{(P - P')}{P'' - P'} \times \frac{P'}{P''}; \text{ et comme}$$

P' diffère peu de P'', $\frac{P'}{P''}$ est sensiblement égal à l'unité.

$$\text{Ainsi l'on a } \frac{c}{c'} = \frac{P - P'}{P'' - P'}.$$

Dans une expérience de MM. Clément et Desormes (*Journ. de Phys.*, t. 89) $P = 0^m,7665$; $P - P' = 0^m,138$; $P' - P' = 0,00361$; ce qui fournit $\frac{c}{c'} = 1,354$.

(*Voy.* un mém. de M. Poisson, *Ann. de Ch. et de Phys.*, t. 23.)

M. Dulong (*Ann. de Ch. et de Phys.*, t. 41, p. 113) a déterminé ce rapport d'une autre manière. Voyez l'*Acoustique*, pour l'explication de ce procédé. Voici le tableau des résultats des expériences de M. Dulong :

NOMS DES GAZ.	Vitesse du son à 0°, d'après la formule de Newton.	Vitesse réelle du son à 0°.	Rapport de la chaleur spécifique du gaz à pression constante et à volume constant.	Chaleur spécifique à volume constant, celle de l'air étant prise pour unité.
Air atmosphérique.	279,29	333,00	1,421	1,000
Gaz oxigène.	266,00	317,17	1,415	1,000
Hydrogène.	1054,80	1269,50	1,409	1,000
Acide carbonique.	226,24	261,60	1,338	1,249
Oxide de carbone.	283,00	337,40	1,427	1,000
Oxide d'azote.	226 00	261,90	1.343	1,227
Gaz oléfiant.	281,99	314,00	1,240	1,754

On ne doit considérer ici que les deux dernières colonnes, et on reviendra à l'article *Acoustique*, sur les deux colonnes contenant la vitesse du son.

Ce tableau montre que les gaz simples ont la même chaleur spécifique sous un volume constant. Nous avons vu que la même identité a été obtenue par MM. Laroche et Bérard pour une pression constante.

135. La chaleur spécifique des gaz, sous pression constante, augmente avec la température. M. Gay-

Lussac, en observant la température du mélange de deux masses d'air égales et prises à des températures différentes, a reconnu qu'elle était plus grande que la moyenne.

136. D'après M. Avogadro (*Ann. de Chim. et de Phys.*, t. 55 et 57) la chaleur spécifique d'un gaz composé, sous volume constant, est exprimée par la racine carrée du nombre entier ou fractionnaire des volumes des gaz simples, qui entrent dans un volume du gaz composé. Cette loi satisfait assez bien en effet à plusieurs cas particuliers, à l'oxide de carbone, au protoxide d'azote, au gaz oléfiant, etc. Le savant Italien propose une loi analogue pour les composés solides ou liquides; mais il faut de nombreuses recherches sur les atomes et sur les capacités, avant que la loi générale des chaleurs spécifiques des corps composés soit bien établie.

Dégagement de Chaleur dans la compression des Gaz.

137. Tous les gaz dégagent de la chaleur par la pression. C'est sur ce dégagement de chaleur qu'est fondé le briquet à air. M. Dessaigne avait annoncé que l'oxigène, l'air et le chlore deviennent lumineux par une compression subite. M. Thénard a montré récemment que cette production de lumière tient à un phénomène chimique, car lorsqu'on comprime l'un de ces gaz dans un briquet exempt de matière grasse, il ne devient pas lumineux. Il faut toute l'autorité de M. Thénard pour nous empêcher d'admettre que tous les gaz doivent dégager de la lumière sous une pression forte et subite. Voyons quel dégagement de chaleur correspond à une pression déterminée.

Représentons par 1 la quantité de chaleur nécessaire pour élever d'un degré la température d'une certaine masse d'air conservant son volume; 1,421 (tableau, p. 66) sera la quantité de chaleur que prendra la même masse d'air, libre de se dilater sous sa pression primitive, et augmentant conséquemment de 1/267 de son volume pris à zéro. Si maintenant ce gaz dilaté est subitement réduit par la compression à son volume primitif, l'élévation de température qui se manifestera sera due tout entière à la portion de chaleur correspondante au seul changement de volume, et sera nécessairement égale 0,421; et comme, d'après les expériences citées de M. Dulong, le rapport des chaleurs spécifiques de gaz simples (oxigène, hydrogène, azote) est sensiblement le même, le dégagement de chaleur pour une même condensation sera le même pour tous les gaz simples.

Le tableau montre que le rapport entre les deux chaleurs spécifiques d'un gaz composé devient d'autant plus petit que la chaleur spécifique, sous volume constant, est plus grande; par conséquent l'élévation de température produite dans les divers gaz composés, par une même condensation, est d'autant plus faible que la chaleur spécifique est plus grande. Si l'on admet que le dégagement absolu de chaleur est le même pour tous les gaz, et que par conséquent l'élévation de température est en raison inverse de la capacité sous un volume constant; si de plus l'on calcule dans cette hypothèse les capacités sous pression constante, on retrouve les nombres connus, comme on peut s'en assurer sur les nombres de la quatrième et de la troisième colonne du tableau :

$$100 : 1,754 :: x : 0,421, \text{ d'où } x = 0,240.$$

On serait donc conduit à cette loi générale : 1° *Les volumes égaux de tous les fluides élastiques, pris à une même température et sous une même pression, étant comprimés ou dilatés subitement d'une même fraction de leur volume, dégagent ou absorbent la même quantité absolue de chaleur;* 2° *les variations de température qui en résultent sont en raison inverse de leur chaleur spécifique à volume constant.*

LOIS DU REFROIDISSEMENT.

138. Un corps chaud, abandonné à lui-même dans l'espace, perd d'autant plus de chaleur dans un temps donné, qu'il est à une température plus élevée au-dessus de celle de l'espace environnant.

Le refroidissement dans le vide est dû au rayonnement seul; dans l'air ou dans un gaz quelconque, la perte occasionée par le contact du fluide s'ajoute à celle que produit le rayonnement.

139. Newton admit *à priori* (*Scala graduum caloris*, *Phil. Trans.*, 1701) qu'un corps échauffé et soumis à une cause constante de refroidissement, telle que l'action d'un courant d'air uniforme, éprouve à chaque instant une perte de chaleur proportionnelle à l'excès de sa température sur celle du milieu environnant; et que conséquemment les pertes de chaleur doivent former une progression géométrique décroissante (*Voy.* les Notes). Kraft et Richmann ont vérifié cette hypothèse par l'expérience. La loi de Newton représente assez exactement la marche du refroidissement d'un corps, quand l'excès de température sur celle du milieu ne surpasse pas 20 à 30 degrés. Mais au delà l'écart entre l'expérience et le calcul est d'autant plus grand que l'excès est plus considérable : ce qui résulte des expériences de Martine et d'Erxleben, de Laroche et de Dalton, de Leslie, et, plus récemment, de celles de MM. Dulong et Petit.

Ce dernier travail, qui a fait connaître les lois du refroidissement dans les gaz et dans le vide, nous servira de guide.

Expériences qui montrent l'inexactitude de la loi de Newton dans l'air et dans le vide.

1re EXPÉRIENCE.

Refroidissement d'un Thermomètre dans l'air.

Excès de température sur celle de l'air.	Vitesse du refroidissement d'un thermomètre dont la boule a deux centimètres de diamètre.
100°	18°,92
80	14 ,00
60	9 ,58
40	5 ,92
20	2 ,75

La *vitesse* du refroidissement est le *nombre de degrés perdus pendant un temps choisi pour unité.*

La colonne des vitesses montre l'inexactitude de la loi de Newton, même dans un intervalle de cent degrés, puisque les rapports entre deux vitesses successives sont 1, 3; 1, 4; 1, 6; 1, 7.

On voit aussi que si le refroidissement était proportionnel à l'excès de la température du corps sur celle du milieu, la vitesse 18,92 correspondante à l'excès de température 100°, devrait être cinq fois plus grande que celle qui correspond à 20°. Cette dernière vitesse est 2°,75; la loi de Newton la donnerait égale à 3°,78 : la différence est environ un degré.

La discordance entre le calcul et l'expérience se réduit à 0°,4 pour les températures 20° et 40°; en sorte que lorsque les températures, comme cela arrive dans beaucoup d'expériences, ne sont éloignées que de quelques degrés, on peut supposer la loi exacte.

2e EXPÉRIENCE.

Refroidissement dans le vide.

Excès de température sur celle de l'espace.	Vitesse du refroidissement.
240°	10,69
220	8,81
200	7,40
180	6,10
160	4,89
140	3,88
120	3,02
100	2,30
80	1,34

Ce tableau met bien mieux que le tableau précédent en évidence l'inexactitude de la loi qui suppose le rayonnement proportionnel à l'excès de température; car, d'après cette loi, la vitesse du refroidissement à 200° devrait être double de la vitesse à 100°; la deuxième colonne de ce tableau nous montre qu'elle est presque triple.

Nous rapporterons encore une expérience de Laroche : dans cette expérience, on recueille la chaleur rayonnante sur un miroir métallique, bien poli. L'effet sur le thermomètre placé au foyer du miroir est évidemment proportionnel à la perte qu'éprouve le corps par le rayonnement, l'absorption par l'air étant presque nulle dans un petit intervalle.

Excès de la température d'un creuset plein de mercure.	Effet sur le thermomètre placé au foyer.	Effet calculé dans la supposition d'un rayonnement proportionnel à l'excès de la température.
81°	4,7°	4,7°
172	18,1	9,98
205	17,4	11,8

Il résulte donc des expériences de Laroche, de MM Dulong et Petit, que le rayonnement du corps se fait, et dans le vide et dans l'air, par une loi différente de celle qu'avaient admises Newton et Richmann.

La première et la deuxième expérience, répétées avec des thermomètres très différens par leur masse ou leur forme, et avec des corps autres que le mercure, donnent toujours le même rapport entre deux vitesses consécutives; ainsi *la loi du refroidissement est la même pour tous les corps.*

MM. Dulong et Petit sont parvenus à une formule qui représente bien tous les progrès du refroidissement dans le vide et dans un gaz quelconque (*Voyez* les Notes.)

140. *Influence de la température de l'enceinte sur la vitesse du refroidissement.* On a rapporté dans le tableau suivant les résultats de plusieurs expériences dans lesquelles la température de l'enceinte a cru suivant une progression arithmétique.

Excès de température du thermomètre.	Vitesse de refroidissement dans l'enceinte.	Vitesse de refroidissement dans l'enceinte.	Vitesse de refroidissement dans l'enceinte.
	à 0°	à 20°	à 40°
240°	10,69	12,40	14,35
220	8,81	10,41	11,98
200	7,40	8,58	10,01
180	6,10	7,04	8,20
160	4,89	5,67	6,61
140	3,88	4,57	5,32
120	3,02	3 56	4,15
100	2,30	2,74	3,16
80	1,74	1,99	2,30

Les vitesses du refroidissement dans l'enceinte successivement portée à zéro et à 20°, sont dans le rapport de $\frac{12,40}{10,69} = 1,16$. C'est là aussi le rapport des vitesses de la troisième et de la quatrième colonne $\frac{14,35}{12,40} = 1,16$. Deux vitesses correspondantes

quelconques donneraient le même rapport. Il résulte de là que le rayonnement *croît*, pour un même excès, avec la température de l'enceinte. De plus, on peut énoncer l'accroissement de la manière suivante;

La vitesse de refroidissement d'un thermomètre, dans le vide pour un excès constant de température croît en progression géométrique, quand la température de l'enceinte croît en progression arithmétique. Le rapport de cette progression géométrique est le même, quel que soit l'excès de température que l'on considère.

141. *Du Refroidissement dans l'air et dans les gaz.* Les lois du refroidissement dans le vide étant connues, rien n'est plus simple que d'apprécier la portion de la chaleur perdue par le contact d'un fluide élastique; il suffit d'observer dans ce fluide le refroidissement du corps qu'on a déjà observé dans le vide; l'effet cherché est la différence entre les deux effets observés.

Expérience avec un thermomètre ayant sa surface naturelle.

Excès de la température du thermomèt. sur celle de l'enceinte.	Vitesse dans l'air.	Vitesse dans le vide.	Différence ou vitesse due au contact du fluide.
200°	14°,04	8°,56	5°,48
180	11,76	7,01	4,75
160	9,85	5,68	4,17

Expérience avec le thermomètre ayant sa surface argentée.

200°	6°,93	1°,50	5°,43
180	6,02	1,23	4,79
160	5,19	1,00	4,19

L'inspection de la quatrième colonne fait voir que l'air enlève la même quantité de chaleur aux surfaces vitreuses et aux surfaces métalliques. Le gaz hydrogène a fourni un résultat semblable; ainsi, vu la grande différence de nature entre le verre et l'argent, entre l'air et le gaz hydrogène, on peut dire *que les pertes de chaleur dues au contact d'un gaz sont, toutes choses égales d'ailleurs, indépendantes de l'état de la surface du corps qui se refroidit.*

142. La vitesse de refroidissement due à un gaz reste la même, si la température et la densité de ce gaz changent de manière à lui conserver une élasticité constante. Cette proposition résulte d'expériences faites dans l'air et dans le gaz hydrogène; nous rapporterons quelques résultats fournis par l'air.

Excès de température du thermomètre sur l'air environnant.	Vitesse de refroidissement due au contact seul de l'air sous 0m,36, et à la température 20°.	Vitesse sous 0m,36 et à 40°.
200°	4°,01	4°,10
160	3,03	2,99
120	2,12	2,16

143. *Les quantités de chaleur enlevées par un gaz, sous diverses pressions variant en progression géométrique, sont aussi en progression géométrique.* Voici quelques nombres.

Excès de température sur l'air environnant.	Vitesse de refroidissement due au contact, sous 0m,72.	1dem. sous 0m,36.	1dem. sous 0m,18.	1dem. sous 0m,09.	1dem. sous 0m,045.
200°	5°,46	4°,01	2°,95	2°,20	1°,59
160	4,17	3,03	2,21	1,62	1,20
120	2,90	2,12	1,57	1,15	0,84
80	1,77	1,29	0,96	0,70	0,52

Le rapport de la progression des pressions est 2; celui de la progression des vitesses est 1,36 pour l'air; ce dernier rapport devient 1,30 pour l'hydrogène, 1,43 pour l'acide carbonique, 1,41 pour le gaz oléfiant.

On peut représenter d'une manière plus simple le résultat précédent.

Si P est le pouvoir refroidissant de l'air sous la pression p, ce pouvoir deviendra $P\,(1{,}366)$ sous la pression $2\,p$; $P\,(1{,}366)^2$ sous la pression $4\,p$; et $P\,(1{,}366)^n$ sous la pression $2^n\,p$. Si l'on fait $2^n p = p'$, et $P\,(1{,}366)^n = P'$, on aura

$$n \log. 2 + \log. p = \log. p'.$$
$$n \log. (1{,}366) + \log. P = \log. P'.$$

D'où $\dfrac{\log. P' - \log. P}{\log. (1{,}366)} = n$, $\dfrac{\log. p' - \log. p}{\log. 2} = n$,

$$\log. P' - \log. P = (\log. p' - \log. p)\,\frac{\log. 1{,}366}{\log. 2}$$

Ou en passant aux nombres

$$\frac{P'}{P} = \left(\frac{p'}{p}\right)^{0,45}$$

Ce qui montre que le pouvoir refroidissant d'un gaz est proportionnel à une certaine puissance de l'élasticité. Pour le gaz hydrogène l'exposant serait 0,38, pour l'acide carbonique 0,517, et pour le gaz oléfiant 0,501.

144. Si l'on compare les vitesses de refroidissement dans différens gaz, dues au contact du gaz seul, on voit qu'elles conservent le même rapport. *La loi de ces vitesses est donc indépendante de la densité des gaz.*

Excès de température du thermomètre sur le fluide environnant.	Vitesse de refroidissement due au contact de l'air, sous 0m,72.	1dem pour l'hydrogène.	1dem pour l'acide carbonique.	1dem pour le gaz oléfiant.
200	5°,48		5°,25	7°,41
180	4,75	16,59	4,57	6,45
160	4,17	14,26	4,06	5,41
140	3,51	12,11	3,39	4,70
120	2,90	10,10	2,82	3,84
100	2,27	7,98	2,22	3,12
80	1,77	6,06	1,69	2,34

Le rapport entre les nombres de la 3e colonne et ceux de la 2e est 3,4; entre ceux de la 4e et ceux de la 3e, c'est 0,96; pour la 5e, c'est 1,3.

145. *Les quantités de chaleur qu'un gaz enlève à un corps croissent en progression géométrique, pour des excès de température de ce corps croissant aussi en progression géométrique.* Le rapport de la progression des excès de température étant 2, celui de la progression des pertes du corps est 2,35. D'où, par des calculs semblables aux précédens (n° 143), on est conduit à ce résultat plus général, savoir : que les pertes de chaleur dues au contact d'un gaz sont proportionnelles aux excès de température des corps élevés à la puissance 1,233.

146. Si nous voulons obtenir l'expression générale du refroidissement occasioné par le contact seul d'un fluide, il faut nous rappeler : 1° que ce refroidissement est indépendant de l'état de la surface du corps; 2° que la température et la densité de ce fluide ne l'affectent qu'autant qu'elles font varier la pression. En sorte que le pouvoir refroidissant d'un fluide ne dépend en définitive que *de l'élasticité*.

Cette élasticité et l'excès de température du corps sont donc les seuls élémens qui fassent varier la vitesse.

Si p désigne la pression, et t l'excès de la température du corps, et V la vitesse du refroidissement, on aura $V = m\,p^c\,t^b$;

b étant le même pour tous les gaz et pour tous les corps, est égal à 1,233 (comme on vient de le voir); c étant aussi le même pour tous les corps, mais variant d'un gaz à un autre, m variant avec la nature de chaque gaz et avec les dimensions du corps;

$c = 0,45$, pour l'air; 0,38, pour l'hydrogène;

m est égal à 0,00919 dans l'air, à 0,0318 dans l'hydrogène pour le thermomètre à surface nue employé dans les expériences citées (ces valeurs de m supposant p exprimé en mètre, et t en degrés centigrades).

Cette formule permet de comparer les pouvoirs refroidissans des différens gaz. En prenant le pouvoir refroidissant de l'air pour l'unité sous la pression $0^m,76$, on trouve celui de l'hydrogène égal à 3,45, et celui de l'acide carbonique égal à 0,965.

147. L'appareil de MM. Dulong et Petit est représenté dans la *fig.* 129.

L'enceinte dans laquelle on observe le refroidissement est formée par un grand ballon en cuivre très mince *MM* dont le diamètre est environ trois décimètres; le col saillant de ce ballon est terminé par une surface plane qu'on rend horisontale à l'aide d'un niveau. Ce ballon est fixé dans une grande cuve cylindrique en bois, pleine d'eau. Les parois de ce ballon, étant très minces et très conductrices, prennent constamment la température de l'eau qui les environne, et, étant recouvertes intérieurement de noir de fumée, elles ne réfléchissent qu'une portion excessivement petite de la chaleur que leur envoie le corps chaud.

L'orifice du ballon est fermé par une plaque épaisse de verre *C D*, usée avec un grand soin sur les bords du ballon. Par l'interposition d'une substance grasse, on rend le contact entre les surfaces très intime, et l'on empêche ainsi toute communication avec le dehors.

La plaque *C D* est percée à son centre d'une ouverture circulaire, dans laquelle on introduit à frottement un bouchon portant la tige d'un thermomètre, dont le réservoir a un volume assez considérable pour que cet instrument ne s'abaisse que d'un petit nombre de degrés, pendant qu'on dispose l'appareil : la tige est recouverte par un tube *A B*, qui est terminé dans sa partie supérieure par une pièce à robinet *R*, à laquelle est adapté un tuyau de plomb très flexible *H K*; l'autre extrémité de ce tuyau est fixée à la platine d'une machine pneumatique qui porte un baromètre destiné à donner le degré d'élasticité de l'air intérieur. Quand on introduit un gaz dans ce ballon, on a soin de le dessécher en le faisant passer dans un tube rempli de chlorure de calcium. Le bouchon dont il vient d'être question est percé d'un trou qui établit une communication entre le tube *A B* et le ballon.

148. La masse, la capacité, la faculté conductrice, l'état de la surface, la nature du milieu environnant, exercent une influence très grande sur le refroidissement. Nous considérerons successivement ces divers points.

L'analyse démontre que le rapport des temps du refroidissement de deux sphères est égal au rapport des carrés des diamètres, si ces sphères ont de grandes dimensions, et seulement égal au rapport simple des mêmes diamètres, si les sphères sont petites (*Théorie de la Chaleur*, de Fourier). Je rapporterai ici deux de mes expériences, dont les résultats sont assez d'accord avec l'analyse. Une boule de zinc du diamètre de $0^m,067$ a perdu 10 degrés de chaleur en $4',21''$; une autre boule du même métal, du diamètre de $0^m,093$, a perdu 10 degrés en $6',29''$.

L'état des surfaces était le même; le pouvoir rayonnant avait été porté au maximum par l'application d'un vernis. Le rapport des temps du refroidissement est 1,48, celui des diamètres est 1,40; le résultat de l'expérience est intermédiaire entre les deux résultats indiqués par l'analyse, parce que en effet les diamètres des deux boules ne sont ni très grands ni très petits.

La capacité (n° 124), la conductibilité, ont aussi une très grande influence sur le refroidissement. Par exemple, toutes les autres circonstances d'ailleurs égales, une masse d'eau exigera beaucoup plus de temps pour se refroidir d'un certain nombre de degrés, qu'une même masse de cuivre dont la capacité n'est que les 95/1000 de celle de ce liquide. On conçoit avec la même facilité que le

refroidissement est d'autant plus rapide que le mouvement de la chaleur est plus facile dans l'intérieur des corps. (*Voy.* plus loin la *Conductibilité.*)

L'agitation de l'air hâte aussi singulièrement le refroidissement, comme une foule d'observations journalières nous l'apprennent.

La rapidité du refroidissement dépend encore de l'état de la surface : Je citerai deux résultats tirés de mes expériences.

Une boule de fer poli de $0^m,067$ de diamètre s'est refroidie de 10 degrés en $9',54''$. La même boule, rouillée par son exposition à l'air humide, a perdu 10 degrés en $6'$.

Couverte d'une couche de vernis, elle a fait la même perte en $5',44''$; enfin, couverte de deux autres couches, elle s'est refroidie encore plus vite, puisqu'elle n'a exigé que $5',40''$ pour perdre le même nombre de degrés.

Nous donnerons plus de développement à cette dernière partie, parce qu'elle est susceptible de nombreuses applications, et qu'elle nous fournira l'occasion d'approfondir la théorie de la chaleur rayonnante (1).

(1) Si la loi de Newton était vraie, les temps étant en progression arithmétique, les excès de la température du corps sur celle de l'espace environnant seraient en proportion géométrique, c'est-à-dire qu'on aurait la série :

Temps.	Excès.
$0'$	E
$1'$	$E\,m$
$2'$	$E\,m^2$
$3'$	$E\,m^3$
⋮	⋮
t	$E\,m^t$

On parvient, comme on va le voir, à cette série en supposant la perte proportionnelle à l'excès de la température du corps sur celle de l'espace environnant. Soit E l'excès initial; le corps perdra $\frac{E}{n}$ dans la première unité de temps, de sorte qu'au commencement de la seconde unité, l'excès sera $E - E\frac{1}{n}$: pendant cette seconde unité, la perte sera, d'après la loi, $\frac{1}{n}E\left(1-\frac{1}{n}\right)$, et conséquemment l'excès de la température au commencement de la troisième unité $E\left(1-\frac{1^2}{n}\right)$; en continuant de la même manière, on trouverait $E\left(1-\frac{1^t}{n}\right)$ au bout du temps t. Ces divers excès, E; $E\left(1-\frac{1}{n}\right)$; $E\left(1-\frac{1^2}{n}\right)$;... $E\left(1-\frac{1^t}{n}\right)$, forment une progression géométrique, dont la raison est $1-\frac{1}{n}$.

149. Les lois relatives à chacun des deux effets qui concourent au refroidissement d'un corps plongé dans un fluide élastique, étant séparément établies, il suffit de les rassembler pour avoir la loi du refroidissement total : ainsi la vitesse du refroidissement sera exprimée par la formule $m\,(a^t - 1) + n\,t^b$; a et b seront pour tous les corps et de tous les fluides, égaux, le premier à 1,0077, et le second à 1,233. Le coefficient m dépendra de la grandeur et de la nature de la surface du corps et de la température de l'enceinte. Le coefficient n, indépendant de cette température absolue, ainsi que de la nature de la surface du corps, variera avec l'élasticité et l'espèce du gaz dans lequel le corps sera plongé. Les variations suivent les lois indiquées ci-avant.

De la réflexion et du rayonnement de la chaleur; de plusieurs phénomènes qui y ont rapport.

150. Il paraît que c'est à Schéele qu'on doit une des premières observations qui démontrent l'influence de l'état de la surface relativement au pouvoir réfléchissant des corps. Cet illustre chimiste

Mais la perte croît plus que proportionnellement à la température, ce qui a été prouvé dans le texte, de sorte que l'excès E au bout du temps t n'est pas $T = E\,m^t$,

$$a\,t + b\,t^2$$

mais $T = E\,m$.

Si les coefficiens m, a et b sont déterminés d'après des expériences, cette formule pourra représenter, avec une grande exactitude, le réfroidissement dans les limites où les coefficiens ont été calculés.

Cette formule empirique permet de calculer la vitesse du refroidissement correspondante à un excès de température, ou le rapport entre l'abaissement de température et le temps pendant lequel il a lieu, en supposant la vitesse uniforme pendant ce temps : en effet, on a $\log. T = \log. E + (a\,t + b\,t^2)\log. m$, ou en différenciant chaque membre $\frac{dT}{dt} = T\,(a + 2\,b\,t)\log. m$, $\frac{dT}{dt}$ vitesse calculée, doit toujours excéder la perte réelle, puisque T diminue pendant l'instant qu'on considère, quelque petit qu'il soit.

Dans l'hypothèse qui donne la formule $T = E\,m^t$, le refroidissement serait représenté par un logarithme dont les ordonnées seraient les excès, et les abscisses les temps correspondans.

Refroidissement dans le vide. Le refroidissement d'un corps dans le vide, d'après la théorie adoptée des échanges de chaleur, est l'excès du rayonnement de ce corps sur celui de l'enceinte; ainsi, en appelant θ la température de l'enceinte, $t + \theta$ celle du corps, on aura en général pour la vitesse V du refroidissement : $V = F(t+\theta) - F(\theta.)$

Si les fonctions $F(t+\theta)$ et $F(\theta)$ étaient proportionnelles à leurs variables, et qu'elles fussent de la forme $m\,(t+\theta)$ et $m\,\theta$, m étant une constante, on trouverait pour la vitesse du refroidissement $m\,t$, et l'on retomberait dans la loi de Newton.

La fonction F, comme le prouvent les expériences

ayant exposé un miroir concave métallique et poli, en face de l'ouverture d'un poêle dans lequel le bois brûlait avec activité, observa que ce miroir réfléchissait toute la chaleur qui arrivait sur sa surface, puisqu'il n'y avait pas d'échauffement sensible. Si l'on enduisait la surface de noir de fumée, le miroir s'échauffait au point qu'on ne pouvait plus tenir impunément la main sur la partie convexe.

151. Déjà nous avons vu, nos 99 et 129, que le rayonnement varie avec l'état de la surface, la température restant la même; d'après cela, on doit s'attendre à trouver les pouvoirs rayonnans différens pour les différens corps; c'est, en effet, ce qui résulte de l'observation. Ce sont particulièrement les travaux de M. Leslie et de Rumford qui ont concouru aux progrès que la physique a faits dans cette partie; ces savans célèbres ont enrichi la science d'une foule de faits aussi curieux qu'importans. La théorie physique de la chaleur en a reçu une vive lumière, et les arts en ont tiré d'importantes applications.

Un des procédés les plus simples pour trouver les pouvoirs rayonnans ou émissifs des différens corps est celui qui a été mis en pratique par Leslie; il consiste à recueillir sur un miroir métallique la chaleur émise par chaque corps porté à une même température. A cet effet, ce physicien célèbre prend un cube creux de fer blanc (*fig.* 130), dont il couvre chacune des faces avec une substance particulière. Il le remplit d'eau à une température connue, en général, à 95 degrés. Plaçant ce cube à trois pieds de distance du miroir au foyer duquel est la boule focale de son thermomètre différentiel, il observe l'effet produit sur ce thermomètre, lorsque celui-ci est stationnaire, c'est-à-dire lorsque la boule reçoit autant de chaleur qu'elle en perd; il présente successivement les trois autres faces, en ayant soin de remplir toujours le cube avec de l'eau à la même température. Le changement de température du milieu est sans influence sur les résultats, puisque l'action de ce milieu est la même sur les deux boules du thermomètre. L'absorption par le miroir et la réflexion par la boule focale d'une partie de la chaleur, ne changent rien aux rapports cherchés (1).

rapportées dans le texte, dépend à la fois de l'excès de température du corps et de la température absolue de l'enceinte.

Les expériences du n° 140, permettent de mettre $F(+\theta) - F(\theta)$ sous la forme $\varphi(t) \times a^{\theta}$.

a étant un nombre constant, et $\varphi(t)$ une fonction de la variable t seulement qu'il s'agit de découvrir, les deux expressions de la vitesse du refroidissement étant égales donnent

$$F(t+\theta) - F(\theta) = \varphi(t)\, a^{\theta}, \text{ d'où}$$

$$\varphi(t) = \frac{F(t+\theta) - F(\theta)}{a^{\theta}} = t\frac{F'\theta}{a^{\theta}} + \frac{t^2}{2}\frac{F''(\theta)}{a^{\theta}} + \frac{t^3}{2.3}\frac{F'''(\theta)}{a^{\theta}} \ldots$$

Cette équation, devant être satisfaite pour toutes les valeurs de t, exige qu'on ait $\frac{F'(\theta)}{a^{\theta}} = m$, ou $F'(\theta) = m.\, a^{\theta}$, ou, en intégrant $F(\theta) = \frac{m\, a^{\theta}}{\log. a} +$ constante (les logarithmes étant pris dans le système Néperien), ou $m\, a^{\theta}$, + constante en faisant $\frac{m}{\log. a} = m$;

de même on aura $F(t+\theta) = m\, a^{t+\theta} +$ constante, d'où enfin pour la vitesse $V = m\, a^{t+\theta} - m\, a^{\theta} = m\, a^{\theta}(a^{t} - 1)$.

Le rayonnement de l'enceinte est représenté par $m\, a^{\theta} +$ constante. Or, comme le point à dater duquel se comptent les températures absolues est arbitraire, on peut le choisir de manière que la constante soit nulle; ce qui réduit l'expression précédente à $V = m\, a^{\theta}$. D'où l'on conclura, que s'il était possible d'observer le refroidissement d'un corps dans le vide, sans restitution de chaleur de la part des corps environnans, *les pertes de chaleur croîtraient en progression géométrique, les températures croissant en progression arithmétique*, et que de plus le rapport de cette progression géométrique serait le même pour tous les corps. De cette loi très simple se déduit, comme une conséquence, celle du refroidissement réel des corps dans le vide.

Si θ est constant, a^{θ} le sera aussi, et la loi du refroidissement pourra s'énoncer ainsi.

Lorsqu'un corps se refroidit dans une enceinte vide et entretenue à une température constante, *la vitesse du refroidissement, pour les excès de température en progression arithmétique, croît comme les termes d'une progression géométrique, diminuée d'un nombre constant.*

MM. Petit et Dulong ont vérifié la formule précédente sur plusieurs cas particuliers, et ils ont trouvé qu'elle est une représentation fidèle de l'expérience.

La valeur de a, raison de cette progression, peut se déterminer d'après les expériences du n° 140; car on voit par ces expériences, que l'excès θ demeurant constant, et la température θ de l'enceinte variant de 20, la vitesse du refroidissement se trouve multipliée par 1,16 et comme dans ces cas deux vitesses consécutives sont :

$$V = m\, a^{\theta}(a^{t} - 1) \text{ et } V' = m\, a^{\theta+20}(a^{t} - 1),$$

on a $\frac{V'}{V} = a^{20} = 1{,}16$; d'où, $a = 1{,}0077$.

En sorte que la formule générale devient

$$V = m.\, 1{,}0077^{\theta}\,(1{,}007^{t} - 1).$$

Pour les expériences rapportées p. 67 et pour le cas où la température de l'enceinte est zéro, on trouverait qu'il faut faire, $m = 2{,}037$. Pour la série des expériences faites dans l'enceinte à 20°, m serait multiplié par $a^{20} = 1{,}165$ et deviendrait 2.374.

Pour les expériences avec le thermomètre à surface argentée m serait égal à 0,375, a conservant la même valeur.

(1) Soit A la quantité de chaleur envoyée au miroir

Nous venons de voir que, lorsque le thermomètre différentiel est stationnaire, la boule focale perd autant de chaleur qu'elle en reçoit; mais la quantité qu'elle perd est proportionnelle à l'excès de sa température sur celle de l'espace environnant (cet excès étant toujours peu élevé), ainsi la quantité qu'elle reçoit est proportionnelle au même excès; si donc R et R' représentent les pouvoirs rayonnans de deux faces, T et T' les températures correspondantes du thermomètre différentiel ou l'excès de la boule focale sur l'espace environnant : on aura

$$R : R' :: T : T'$$

En représentant le pouvoir rayonnant du noir de fumée par 100, on trouve pour le papier, le verre, les pierres, etc., un pouvoir un peu plus faible, et les métaux polis, (étain, cuivre, or, argent, etc.) un pouvoir représenté par 12. On aurait des résultats plus approchés de la vérité, en laissant refroidir dans le vide, d'un certain nombre de degrés, le même corps successivement revêtu d'une surface différente; car l'abaissement étant le même, et la chaleur perdue étant aussi la même, les pouvoirs rayonnans seraient nécessairement en raison inverse des temps du refroidissement. On pourrait encore employer avec succès le thermo-multiplicateur, ce qui a été fait par M. Melloni (voyez les phénomènes thermo-électro-dynamiques).

152. Pour connaître les pouvoirs réfléchissans, on couvre successivement la surface du miroir de diverses substances, et l'on reçoit à chaque fois la chaleur réfléchie sur la boule focale. Dans cette détermination, il est bien sous-entendu que la même surface est tournée vers le miroir et que l'eau du cube est remise à la même température à chaque expérience. L'effet est proportionnel à la chaleur réfléchie par le miroir à son foyer; et comme la boule focale du thermomètre réfléchit toujours une quantité de chaleur proportionnelle à celle qu'elle reçoit, il en résulte que les effets observés représentent bien le rapport des pouvoirs réfléchissans.

Il y a un second procédé fondé sur cette remarque : si entre le foyer et le miroir, on place une lame métallique polie, perpendiculaire à l'axe du miroir, elle réfléchira les rayons sans en altérer l'inclinaison sur l'axe; de sorte que si $m F$ et $m' F$ (*fig.* 131) sont deux rayons réfléchis, allant concourir en un point F, le petit miroir plan $a b$ interposé réfléchira les rayons $m F$ et $m' F$, et en déterminera la réunion en F; et vu l'égalité des triangles $F a K$ et $F' a K$, on aura $K F = K F'$. Il suffit donc de faire l'expérience en plaçant successivement en K une lame des diverses substances qu'on veut examiner, et d'observer l'effet produit au foyer secondaire F'. Cet effet est nécessairement plus faible que celui qu'on obtient par la première méthode; mais comme la diminution est proportionnelle à la chaleur tombée sur la lame métallique, les rapports des effets ne sont pas altérés. On le démontrerait comme dans la note précédente. On a trouvé les résultats suivans :

Cuivre jaune, or, argent poli	100
Plomb	60
Verre, papier	10
Noir de fumée	0

Rumford est arrivé aux mêmes résultats par des méthodes un peu différentes. (*Mémoires sur la Chaleur.*)

Voici un troisième procédé plus exact. Il consiste à déterminer les pouvoirs absorbans. Pour cela, on place dans la même enceinte un même corps successivement revêtu de surfaces différentes (voyez l'appareil du refroidissement) et l'on note le temps nécessaire pour qu'il monte d'un degré. Les pouvoirs absorbans seront en raison inverse du temps. Si l'on représente celui du noir de fumée par 1, les autres seront des fractions, le complément de chaque fraction sera le pouvoir réfléchissant. Celui du noir de fumée sera nul, ce qui est peu éloigné de la réalité. (M. Dulong.)

153. Ce dernier procédé est fondé sur l'égalité du pouvoir émissif et du pouvoir absorbant. Il nous semble qu'on peut démontrer cette égalité de la manière suivante.

Si l'on place un corps dans une enceinte entretenue à une température constante, il finira par se mettre en équilibre de température. Dans cet état, il émet évidemment une quantité de chaleur égale à celle qu'il reçoit. Mais comme on peut prendre l'enceinte à une température quelconque, il s'ensuit que l'égalité du pouvoir émissif et du pouvoir absorbant a lieu à toutes les températures.

M. Dulong constate cette égalité d'une autre manière. Il place un thermomètre dans une enceinte couverte de noir de fumée et entretenue à la température 0. Il observe le refroidissement du ther-

par une face; $\frac{2}{m}$ le coefficient de l'absorption du miroir.

$A - \frac{A}{m}$ ou $A \frac{(m-1)}{m}$ sera celle que réfléchit le miroir sur la boule focale. Cette boule absorbera $A \frac{(m-1)}{m} \frac{(n-1)}{n}$. Si $\frac{1}{n}$ est le coefficient de la réflexion de la boule.

Pour une surface qui enverrait B de chaleur, la boule focale en absorberait $B \frac{(m-1)}{m} \frac{(n-1)}{n}$; ainsi les quantités de chaleur absorbées par la boule sont dans le même rapport que les quantités envoyées par les faces.

L'air atmosphérique absorbe aussi une quantité de chaleur proportionnelle à celle qui est émise. Cette quantité est d'ailleurs très faible.

mètre lorsque l'excès n'est que de 5°; puis il porte l'enceinte à 10° et le thermomètre à 0. Il attend que celui-ci soit à 5° pour observer l'échauffement. Or, dans le premier cas, la perte de chaleur, à dater de 5°, est proportionnelle à l'excès 5°, et au pouvoir émissif E. Ainsi elle est égale $5\,E$ multiplié par un coefficient Q dépendant de la nature, de la forme et du volume du thermomètre. Dans le second cas, la quantité de chaleur absorbée est proportionnelle à l'excès 5°, et au pouvoir absorbant A multiplié par le même coefficient Q. Or l'expérience montre que, quelle que soit la substance qui recouvre le thermomètre, il y a égalité entre la perte et le gain dans le même temps; donc $A = E$.

Chaque élément d'une surface peut être divisé en deux parties égales ou inégales, dont l'une est privée de toute réflexibilité, et dont l'autre est un miroir parfait. Le rapport de ces deux parties est un coefficient dépendant de l'état de la surface, et que les observations ont donné sensiblement constant pour des intervalles de température peu étendus. Soit un faisceau $s\,t$ (*fig.* 135 *bis*), d'une intensité représentée par J, tombant sur une surface $A\,B$; il se partagera en deux parties, une partie $a\,J$ pénétrera dans le corps, et l'autre partie $(J - aJ)$ sera réfléchie suivant ts'; le coefficient a est un nombre fractionnaire qui exprime la réflexibilité de la surface. Si maintenant un faisceau $t\,s$ de même intensité tendait à sortir du solide suivant une direction contraire il serait décomposé en deux parties aJ et $(J - aJ)$; la première partie sortirait du corps, la dernière serait rappelée vers l'intérieur. C'est là ce qui constitue l'égalité réciproque du pouvoir émissif et du pouvoir absorbant et ce qui rend manifeste l'égalité des échanges avec l'espace environnant. Cette considération, qu'on doit à Fourier, est indépendante de la valeur particulière de a.

154. Les nombres rapportés font voir que les substances (les métaux polis) qui jouissent de la propriété d'émettre le moins la chaleur, la réfléchissent en plus grande abondance; et qu'au contraire celle qui, comme le noir de fumée, le verre, ont un pouvoir rayonnant considérable, ne jouissent que d'un pouvoir réflecteur très faible. Ainsi, les pouvoirs réflecteurs de deux corps sont d'autant plus faibles que les pouvoirs absorbans sont plus forts, mais ils ne sont pas en raison inverse. En effet, soit 1 la quantité de chaleur reçue par une surface, a la quantité absorbée, $1 - a$ sera la chaleur réfléchie; si une surface possède un pouvoir absorbant double, elle retiendra $2a$, et ne réfléchira que $1 - 2a$; or, en général, les quatre nombres $1 - a$, $1 - 2a$, ne forment pas une proportion.

Non seulement le poli, mais encore la nature intime des substances, a une influence sur le rayonnement et la réflexion de la chaleur, puisque deux substances différentes qui ont reçu le même poli réfléchissent et émettent la chaleur inégalement.

Quel que soit le poli d'un corps, il ne réfléchit jamais en totalité la chaleur qui tombe sur sa surface.

155. Dans le cours de ces expériences, on a occasion de faire une remarque importante relativement à la théorie physique de la chaleur, c'est que la réflexion et le rayonnement ne s'opèrent pas seulement à l'extrême superficie, mais à une certaine profondeur. Les expériences rapportées plus haut (n° 129) prouvent bien en effet que la profondeur à laquelle commence le rayonnement est appréciable, puisqu'il a fallu l'application de plusieurs couches de vernis pour le porter au maximum. Pour constater que la réflexion commence aussi à une certaine profondeur, il suffit de recevoir la chaleur rayonnante d'une source quelconque sur un miroir métallique poli, et de couvrir ce miroir successivement de couches minces de vernis. On voit que la première couche affaiblit considérablement le pouvoir réflecteur, mais qu'elle ne le réduit pas au minimum. Nous ajouterons que l'épaisseur de la couche de vernis à travers laquelle s'opèrent le rayonnement et la réflexion est très petite; cette épaisseur est encore moindre pour les corps métalliques; ainsi, une portion concave de sphère en bois, recouverte d'une feuille métallique, réfléchit la chaleur avec la même facilité qu'un miroir métallique massif qui aurait le même poli.

156. A chaque instant une foule de faits analogues aux précédens s'offrent à nous dans la vie commune. Ainsi, les vases bien polis s'échauffent et se refroidissent lentement; c'est le contraire pour les vases rouillés ou salis par l'usage; les vêtemens noirs, dont le pouvoir absorbant ou émissif est considérable, sont chauds en été et froids en hiver : les vêtemens blancs, par une raison contraire, sont frais en été et chauds en hiver.

157. Reprenons maintenant plusieurs points de la théorie de la chaleur rayonnante, dont l'examen nous conduira à une explication claire et rigoureuse de la formation de la rosée et d'autres phénomènes analogues.

Un thermomètre placé dans une enceinte de forme quelconque, et conservant la même température, marque le même degré, quelle que soit sa position.

158. Soit un point O (*fig.* 135), menons de ce point un cône circulaire, d'une ouverture infiniment petite ω; ce cône contiendra tous les rayons que reçoit le point O de l'élément correspondant SS de la paroi. Décrivons du point O, avec un rayon égal à OS, une surface sphérique qui coupe la paroi suivant SQ; le solide $SS'\,Q$, ayant ses trois dimensions infiniment petites, pourra être négligé relativement au solide $SQVV'$, qui a une dimension finie SV ou QV', distance à laquelle le rayon-

nement s'opère dans la substance qui forme la paroi de l'enceinte (n° 157).

Plaçons au point O un élément s; supposons-le incliné de l'angle θ sur le rayon OS.

Prenons un point m dans la partie de la paroi que nous considérons. Soit n le nombre des rayons calorifiques que recevra à l'unité de distance une étendue sphérique décrite du point m comme centre, et égale à l'unité de surface. Soit r la distance du point O à l'élément SS', et a la longueur de $o\,m$; cette étendue n'en recevrait que $\frac{n}{(a+r)^2}$ à la distance $r+a$; l'élément s, projeté sur une perpendiculaire à mO, donnera s sin. θ. Cet élément recevra (n° 98) une quantité de chaleur égale à $\frac{n\,s \sin.\theta}{(r+a)^2}$ ou $\frac{n\,s \sin.\theta}{r^2}$, si l'on néglige a, qui est toujours très petit par rapport à la distance à laquelle le thermomètre peut être placé. Si nous considérons maintenant tous les points rayonnans pris jusqu'à la profondeur $m\,e$, nous aurons un facteur commun $\frac{s \sin.\theta}{r^2}$, et si nous représentons par J la somme de tous les rayons envoyés par cette ligne, $\frac{J.\,s \sin.\theta}{r^2}$ sera celle que reçoit l'élément s.

La quantité totale de chaleur émise par le tronc de cône $SQVV'$ sera proportionnelle à l'élément SS'; mais la quantité ω étant l'ouverture du cône SOS', elle représentera la section superficielle de ce cône à l'unité de distance, et conséquemment $\omega\,r^2$ la surface de l'élément SS' à la distance r. Ainsi $J\,s\,\omega$ sin. θ sera la quantité totale de chaleur envoyée par l'élément SS' à l'élément s. Dans cette expression ω sin. θ est la projection de l'étendue sphérique ω sur s prolongé. Pour avoir la quantité de chaleur reçue par l'élément s de tous les points des parois environnantes, il faut sommer les expressions $J\,s\,\omega$ sin. θ fournies par les cônes qui, partant des parois, ont l'élément s pour base, ce qui limite la somme de tous les angles ω à une demi-sphère. Dans cette sommation J et s restent constans. Si donc π représente la somme de tous les produits ω sin. θ l'effet cherché sera $J\,\pi\,s$. Il est visible que cette expression conserve la même valeur, quelque part qu'on place l'élément superficiel, puisque les trois quantités J, π, s sont indépendantes de cette position. Il en sera encore de même d'un corps; dans ce cas, la quantité de la chaleur reçue se composera de la somme de celles que reçoit le corps, et sera représentée par $J\,\pi\,S$, S étant la surface du corps. Tout ce qui précède ne s'applique qu'à la portion de chaleur émise par le rayonnement. Il est facile de calculer de même la portion réfléchie. En effet, si nous considérons le même élément SS', qui, vu du point O, soutend un angle égal à ω, la somme des rayons qui arriveront au point O pourra être calculée comme si elle émanait directement de la surface sphérique SQ. Si l'on appelle i le nombre des rayons reçus à l'unité de distance par l'unité de surface, $\frac{i\,s \sin.\theta}{r^2}$ sera le nombre de rayons reçus par l'élément s à la distance r, et en multipliant par $\omega\,r^2$, surface de l'élément SQ, on aura $i\,s\,\omega$ sin θ pour le nombre total des rayons réfléchis par l'élément SS' sur l'élément s. On trouvera comme ci-dessus, $i\,\pi\,s$ pour la quantité totale de chaleur reçue par l'élément s et $i\,\pi\,S$ pour celle que reçoit le corps, laquelle est indépendante de la position du corps.

L'homogénéité des parois n'a que bien rarement lieu dans la nature : cette homogénéité n'est pas nécessaire, l'égalité de température suffit; en effet, si un élément rayonne moins de chaleur qu'un autre, il devra en réfléchir davantage, de manière que la somme soit constante. Ainsi l'effet sur le thermomètre reste le même.

159. Il résulte de ce qui précède que, si l'on intercepte un cône par différentes surfaces de même nature et ayant la même température, elles enverront au sommet la même quantité de chaleur (*fig.* 138).

160. 1° Si un thermomètre infiniment petit m (1), placé dans une enceinte, a acquis une température fixe t qui est aussi celle de l'enceinte, et que l'on place un écran FF' (*fig.* 132) dont la température soit la même que celle de la portion correspondante CC' de l'enceinte, ce thermomètre conservera sa température; car il recevra de cette surface autant de chaleur qu'il en recevrait de la partie cachée CC' (n° 161). Nous considérons la surface FF' comme entièrement privée de la propriété de réfléchir la chaleur. Supposons maintenant que la surface FF' réfléchisse toute la chaleur qu'elle reçoit, elle n'aura pas de température propre, puisqu'elle aura un pouvoir émissif nul; il faudra lui attribuer la température de la portion de l'enceinte HH', dont la chaleur réfléchie sur le thermomètre par l'écran FF' remplace celle que lui enverrait $C'C$; ni l'un ni l'autre cas ne peut se présenter dans la nature. L'écran réfléchit et émet de la chaleur; mais comme le pouvoir émissif est complémentaire du pouvoir réfléchissant, l'effet est le même que si l'un ou l'autre de ces pouvoirs était complet. Pour le montrer, soit un rayon BAm, envoyé par la paroi et arrêté par l'écran FF'; ce rayon sera remplacé par le rayon Am, émis par ce miroir, et par le rayon réfléchi KAm. La somme de ces rayons équivaut au rayon direct BAm ou KA, puisque la paroi est partout la même. La même considération s'applique à une portion quelconque de l'enceinte.

(1) Nous supposons au thermomètre des dimensions infiniment petites; les explications seraient encore les mêmes si cet instrument avait des dimensions finies.

2° Si l'on substitue à l'écran FF' un écran HH' (*fig.* 133), dont la température t' soit moindre que t, le thermomètre baissera; car on remplace l'action de la partie CC' par celle de la surface HH' : si en outre on place un miroir KK' propre à réfléchir sur le thermomètre la chaleur qu'il reçoit du plateau HH le thermomètre baissera davantage; en effet, ce miroir intercepte la chaleur envoyée par la portion de l'enceinte $D'D$ et la remplace par la chaleur plus faible qu'il reçoit de l'écran HH'.

3° Ajoutons un dernier cas : supposons qu'un thermomètre m placé au foyer d'un miroir HH' *fig.* 134, dont l'axe se confond avec celui d'un second miroir KK', ait acquis dans une enceinte une température fixe, si l'on place un corps froid A au foyer du miroir KK', le thermomètre baissera. On fait cette expérience dans les cours en mettant en A un matras rempli de neige. On avait d'abord cru voir dans cette expérience l'indication de l'existence des rayons frigorifiques; mais l'explication est aussi simple que celle des cas précédens. Sans le corps froid, tout rayon parti de l'enceinte et passant par le foyer A, irait se réfléchir en m sur le thermomètre. Le corps froid arrête les rayons et y substitue ses propres rayons qui sont beaucoup moins chauds, le thermomètre doit baisser. Il est visible que l'abaissement est plus grand qu'il ne serait sans le miroir KK'.

Le raisonnement serait absolument le même si le corps A était plus chaud que l'enceinte et le thermomètre, celui-ci monterait.

M. Pierre Prevost, de Genève a donné le premier l'explication des effets produits par la réflexion apparente du froid. Il a reconnu que les corps émettent la chaleur rayonnante à toutes les températures, et qu'ils se l'envoient mutuellement, de même que les corps lumineux se communiquent la lumière. (*Journ. de Phys.*, 1792; *Essais de Phys.* de M. Pictet. *Observations sur la chaleur rayonnante*, par M. Fourier. *Ann. de Chim. et de Phys.*, t. 6; idem, t. 26. par M. Poisson, etc.)

ROSÉE.

161. Il résulte des expériences précises et variées de M. le docteur Wells, que le refroidissement des corps *précède* toujours l'apparition de la rosée; de sorte qu'il faut admettre que la rosée est la *conséquence*, et non la *cause* du refroidissement des corps sur lesquels elle se dépose. S'il n'en était pas ainsi, tous les corps devraient s'en couvrir et se refroidir également. Or, l'observation apprend que la température des métaux ne s'abaisse que de 2 degrés au-dessous de celle de l'atmosphère, tandis que l'abaissement de la température de l'herbe, du papier, du verre, va quelquefois jusqu'à 8 degrés. Ces derniers refroidissent l'air qui les enveloppe et en précipitent *de la vapeur*. Nous verrons plus loin qu'un gaz peut contenir d'autant plus de vapeur qu'il a une température plus élevée.

Maintenant, quelle est la cause de ce refroidissement inégal? C'est, d'après M. Wells, *le rayonnement de la chaleur*; en effet, les corps dont la faculté rayonnante est grande, se refroidissent considérablement : tels sont le verre, le papier, les matières organiques. Les corps dont le rayonnement est faible se refroidissent peu. Tels sont les métaux polis. De plus, toutes les circonstances qui tendent à augmenter le rayonnement augmentent le froid produit, et par suite le dépôt de rosée : ainsi, sous un *ciel pur*, la chaleur lancée vers les régions supérieures de l'atmosphère, se perd dans l'espace, et la rosée se forme en abondance; sous un *ciel couvert*, les nuages *compensent*, par leur rayonnement propre et par la réflexion, la chaleur perdue par les corps placés à la surface de la terre, et s'opposent par cela même à la formation de la rosée. C'est par une raison semblable qu'il ne se dépose pas de rosée sous les arbres et près des édifices.

On conçoit encore facilement pourquoi les vents qui s'élèvent pendant la formation de la rosée en arrêtent ou en retardent les progrès; ils amènent de nouvelles couches d'air chaud, qui cèdent aux corps terrestres une portion de leur chaleur propre et les empêchent de se refroidir; de plus, le renouvellement de l'air accélérant l'évaporation, doit encore être contraire à la formation de la rosée, parce que les courans d'air chaud dessèchent rapidement les corps humides.

Tout ce qui augmente l'humidité de l'air, toutes choses égales d'ailleurs, favorise la formation de la rosée. Ainsi, en France, elle est abondante quand le vent a apporté l'air de l'ouest ou du sud.

162. Voici une expérience curieuse de M. Wollaston, qui se rattache au sujet qui nous occupe. Supposons qu'un thermomètre exposé le soir à l'air libre, sous un ciel serein, soit parvenu à une température fixe; si l'on interpose un miroir métallique très poli, dont la concavité soit tournée vers le ciel et dont le thermomètre occupe le foyer, à l'instant l'équilibre cessera d'avoir lieu (*fig.* 137). C'est une expérience analogue à celle que nous avons citée relativement à la réflexion apparente du froid. Le miroir qui intercepte le rayonnement de la terre réfléchit sur le thermomètre les rayons plus froids des régions supérieures de l'air. En faisant cette expérience, on remarque que la présence d'un nuage au zénith fait quelquefois monter le thermomètre de plusieurs degrés. Le succès de cette expérience exige le concours de plusieurs circonstances qui ne se trouvent pas toujours réunies. Il serait incertain si les corps inférieurs étaient très froids à leur superficie; si la loi du décroissement de la température de l'air était intervertie, ce qui arrive souvent; le docteur Wells a souvent vu des thermomètres monter, sans le secours d'un miroir, de plusieurs degrés par la présence d'un nuage.

Nous ajouterons un fait dont on n'a pas donné l'explication, mais qu'il est bon de connaître. Dans une nuit *calme* et *serene*, la température de l'air va en croissant depuis le sol jusqu'à une certaine hauteur, après laquelle la température prend le décroissement connu. C'est environ à 220 pieds que la température est la même que la surface du sol. Ce fait a été constaté par M. A. Pictet, M. Six et M. Wells.

Le fait du refroidissement de la surface de la terre étant admis, on conçoit que les parties de l'atmosphère en contact avec elle doivent se refroidir plus que les parties qui en sont éloignées; cette explication que nous hasardons rendrait compte du phénomène, si l'accroissement de température dont il est question n'avait lieu que jusqu'à une petite hauteur de l'atmosphère.

Phénomènes dont la théorie est la même que celle de la rosée.

163. Nous parlerons d'abord de plusieurs faits découverts par M. Benedict Prevost, et dont M. Pierre Prevost a donné l'explication d'après sa théorie ingénieuse du rayonnement de la chaleur.

Tout le monde a remarqué que lorsque l'air extérieur se refroidit pendant la nuit, les vitres des fenêtres se couvrent d'humidité intérieurement, et que le contraire arrive si l'air du dehors est devenu plus chaud que celui de l'intérieur. Voici maintenant ce qu'a observé M. Prevost. Si l'on colle sur la face du côté de l'air froid d'un carreau une lame de métal poli, il ne se déposera que peu ou point d'humidité sur la partie du carreau en contact avec l'air chaud, correspondante à l'armure métallique, tandis que le reste du carreau sera couvert de rosée. La lame métallique placée sur la face contiguë à l'air froid, rayonne beaucoup moins que le verre, et empêche ainsi le verre de se refroidir. L'humidité doit donc moins se déposer sur la face opposée à l'armure que partout ailleurs. La lame métallique se couvre abondamment d'humidité, si elle est placée sur la face contiguë à l'air chaud; elle repousse dans l'intérieur toute la chaleur rayonnante qui tendrait à s'introduire de ce côté dans le verre, et dont l'effet serait d'en élever la température, tandis qu'elle n'empêche pas la face opposée de se refroidir par la voie du rayonnement et de la communication. Si les deux masses d'air conservent long-temps leur température actuelle, l'effet de la communication l'emporte sur celui du rayonnement, et l'humidité se dépose partout.

164. Beaucoup de personnes ont pu remarquer que le froid qu'on éprouve en hiver est plus vif le soir que pendant le jour, par un temps serein que par un ciel couvert de nuages; l'explication de ces phénomènes rentre dans l'explication donnée plus haut pour la rosée : il est encore tout simple que le froid soit moins grand sous un abri quelconque, par exemple sous un arbre, sous un parapluie, qu'à l'air libre.

On explique encore par la même théorie pourquoi un thermomètre noirci marque pendant la nuit une température plus basse que celle qu'indique un thermomètre couvert d'une enveloppe métallique.

On trouve encore dans la théorie du rayonnement de la chaleur, l'explication de cet usage ancien chez les jardiniers, de défendre les pêchers, les abricotiers et d'autres plantes délicates, de l'action du froid, en les couvrant d'une natte mince. M. le docteur Wells a fait des expériences directes qui montrent bien que la théorie de la rosée eût conduit à ce moyen, s'il n'était déjà établi par un long usage. Ainsi un thermomètre placé sous un mouchoir fixé à quelques pieds de hauteur, marquerait 3 à 4 degrés de plus qu'à l'air libre; c'est de la même manière que les arbres élevés défendent les vignes dans les hivers rigoureux.

Pendant les froids de l'hiver de 1794, les vignes de la Bourgogne non plantées d'arbres furent détruites; celles dans lesquelles les arbres fruitiers étaient nombreux résistèrent au froid.

165. On forme artificiellement de la glace au Bengale pendant des nuits où la température de l'air est supérieure à zéro. On pratique à cet effet des excavations carrées de 30 pieds de côté et de 2 pieds de profondeur; on couvre le fond d'une couche de cannes à sucre ou de tiges de maïs; on place ensuite sur cette couche des terrines épaisses de 1/4 de pouce, profondes de 1 pouce 1/4, et remplies d'eau. En général, on a remarqué qu'il ne se produit beaucoup de glace que par une atmosphère calme, et sous un ciel pur. C'est par le rayonnement que l'eau se refroidit, parce que toutes les circonstances qui favorisent le rayonnement favorisent la formation de la glace. D'après M. Williams, l'eau dans ces circonstances gèle quand la température de la paille qui environne les pots est à 2 et même à 5°, 6 au-dessus de zéro.

La formation de cette glace n'est pas due au froid produit dans l'évaporation; car il est constaté, 1° que le vent qui favorise l'évaporation, est contraire au succès de l'opération; 2° que la glace se forme en grande quantité même dans les nuits où la rosée est très abondante, et qu'il y a contradiction de supposer que d'une part l'air se charge d'humidité, et que de l'autre il en abandonne; 3° que la congélation artificielle n'a jamais lieu dans les circonstances qui ne sont pas favorables au rayonnement, par exemple, sous un ciel obscur; enfin, dans plusieurs expériences, on a reconnu que la glace pesait plus que l'eau employée.

On a pratiqué ce procédé en grand près de Saint-Denis; mais l'établissement qu'on avait fondé à cet effet a arrêté ses travaux. On y avait obtenu des quantités immenses de glace.

166. *Lame rousse.* Les jardiniers des environs de

Paris ont remarqué que lorsque le ciel est serein pendant les nuits de la fin d'avril et du commencement de mai, les feuilles des bourgeons roussissent; c'est pour cela qu'ils ont donné à la lune de cette époque le nom de *lune rousse*. Si le ciel est nuageux, disent-ils, il arrête les rayons frigorifiques de l'astre, et les empêche d'arriver jusqu'aux plantes. L'explication de ce phénomène est tout-à-fait la même que celle de la rosée, comme M. Arago l'a fait voir (*Annuaire*, 1827). La lune n'exerce aucune influence sur les plantes; seulement quand elle est visible, le ciel est serein, et le rayonnement nocturne considérable, et, par suite, les plantes et tous les objets placés à la surface de la terre éprouvent une perte considérable de chaleur.

167. *Congélation des rivières.* L'intensité et la durée du froid; la vitesse et la plus ou moins grande hauteur des eaux, sont les seuls élémens qu'il paraisse d'abord important d'examiner quand on étudie le phénomène de la congélation des rivières. M. Arago a montré que le rayonnement nocturne est aussi une cause très influente; nous citerons plusieurs exemples rapportés par ce savant.

En 1763, la Seine fut totalement prise à la suite de six jours de gelée, et *serein*, dont la température moyenne était de — 3°,9, et pendant lesquels le plus grand froid n'avait point dépassé — 9°,7; tandis qu'en 1748, la Seine n'était pas gelée après huit jours *nuageux*, d'une température moyenne de — 4°,5, et pendant lesquels le plus grand froid avait été jusqu'à — 12°,0; la hauteur des eaux était la même aux deux époques: le rayonnement de la chaleur, beaucoup plus grand en 1762, qu'en 1748, a donc déterminé le refroidissement de la surface de l'eau. M. Arago rapporte plusieurs autres circonstances où un ciel serein fut la cause principale de la congélation de la Seine. (*Annuaire de* 1828, p. 174.)

Propagation de la chaleur dans l'intérieur des corps. — Loi de cette propagation. — Détermination de la conductibilité intérieure ou extérieure.

168. Dans le chapitre précédent, nous avons considéré la communication de la chaleur par voie de rayonnement à distance. Nous nous occuperons de la communication au contact. Les corps diffèrent autant par la propriété de conduire la chaleur que par les autres propriétés.

Le cas le plus simple de la propagation de la chaleur dans l'intérieur des corps solides est celui qui est offert par un corps, terminé par deux plans indéfinis, entretenus l'un, BC, à une température constante b; l'autre, AD, à une température constante a (*fig.* 147 *bis*). a étant plus grand que b, il arrivera nécessairement un moment où chaque tranche parallèle aux plans indéfinis conservera une température constante, et sera traversée conséquemment par une même quantité de chaleur.

Si nous admettons que la communication se fasse d'une tranche à la suivante, proportionnellement à l'excès de la température de la première sur celle de la seconde. La différence entre deux tranches consécutives quelconques sera constante. En sorte que les diverses températures formeront une progression arithmétique décroissante du plan AD au plan BC. Ainsi e étant l'épaisseur du solide, z la profondeur d'une certaine tranche dont la température est t, on aura dans l'état d'équilibre $t = a - \frac{(a-b)}{e} z$. Pour un second corps de la même substance, dont l'épaisseur serait e' et les températures extrêmes a et b', on aurait $\theta = a' - \left(\frac{a'-b'}{e'}\right) z'$

La différence entre les températures de deux tranches consécutives, dans le premier corps, distantes de z et $z + d$ serait $t - t' = \left(\frac{a-b}{e}\right) d$ dans le premier et $\theta - \theta' = \frac{a'-b'}{e'} d$ dans le second.

Les quantités Q et Q' de chaleur qui passent de la première tranche dans la seconde, pour l'un et l'autre corps, seraient proportionnelles à $t - t'$ et $\theta - \theta'$ et à $\left(\frac{a-b}{e}\right) d$ et à $\left(\frac{a'-b}{e'}\right) d$. Ainsi l'on a $Q : Q :: \frac{a-b}{e} : \frac{a'-b'}{e'}$.

Si l'on suppose $a' = 100°$, $b' = o$, $e' = 1^m$, et qu'on représente par K la quantité de chaleur qui passe, pendant l'unité de temps, à travers l'unité de surface et l'unité d'épaisseur, par une différence de température égale à 100°, la proportion précédente devient:

$$Q = K \frac{(a-b)}{e}.$$

Ainsi l'on déterminerait la quantité de chaleur qui passe à travers un mètre d'un corps terminé par deux plans parallèles entretenus chacun à une température fixe, si l'on connaissait la quantité qui traverse un mètre carré, de la même substance, d'une épaisseur égale à 1 mètre, et dont les faces sont entretenues l'une à 100° et l'autre à 0°.

Supposons un ballon formé par un métal. Faisons plonger ce ballon dans de la glace à 0, et introduisons-y un courant de vapeur qui entretienne la température de la face intérieure à 100°. La face extérieure sera à 0 si l'on a le soin d'enlever l'eau à mesure que la glace sera fondue. Si P est le poids de la glace, S la surface extérieure ou intérieure (elles sont sensiblement égales), 75 le nombre de degrés dont élèverait 1 kilogr. d'eau la quantité de chaleur absorbée par la fusion d'un kilogr. de

glace, t la durée de l'expérience, e l'épaisseur de la paroi du ballon, on aurait la relation $\frac{75\,P}{S\,t} = K$ $\frac{100}{e}$, d'où l'on tirerait K, la conductibilité de la substance.

Peut-être serait-il plus commode de plonger le ballon dans une grande masse d'eau. La connaissance des températures au commencement et à la fin de l'expérience ferait connaître également K.

Si la face b, toujours entretenue à une température constante, rayonnait dans une enceinte à la température c; alors si l'on représentait par h la conductibilité extérieure, c'est-à-dire la quantité de chaleur perdue par l'unité de surface, pendant l'unité de temps, pour une différence de température égale à l'unité, on aurait la relation $h\,(b-c) = K\,\frac{a-b}{e}$, qui servirait à la détermination de h, si les autres élémens étaient connus. On pourrait aussi déterminer cet élément par le refroidissement des corps dans une enceinte entretenue à une température constante.

169. *Propagation dans une barre.* La perte qu'éprouve chaque point de la surface de la barre, et par le rayonnement et par le contact du milieu environnant, rend ce cas plus compliqué que le précédent; la barre est arrivée à l'état final ou stationnaire, lorsque chaque section reçoit de la section précédente une quantité de chaleur égale à celle qu'elle cède à la section suivante et à l'espace environnant.

Il y a plusieurs cas à considérer :

Cas où la température est la même pour tous les points d'une même section.

Si la barre est infinie, la température y est représentée par la formule $y = M\,E^{-ex}$. Ainsi elle varie en progression géométrique, quand la distance x à la source varie en progression arithmétique; si la barre est finie, la température y est donnée par la formule $y = ME^{-ex} + NE^{ex}$. Si on considère trois termes consécutifs de cette série récurrente, et qu'on divise la somme des deux termes extrêmes par le terme intermédiaire, on aura un quotient *constant* dans toute l'étendue de la barre.

Dans le cas où la température change dans l'étendue d'une section et où la barre est infinie, la température des points de l'axe, suffisamment éloignés de la source de chaleur, varie en progression géométrique, quand la distance à cette source varie en progression arithmétique; il en est de même de tous les points situés sur des parallèles à l'axe; de plus, la température moyenne des sections normales à l'axe, suit la même loi. (Fourrier, *Théorie de la chaleur*, p. 404.)

Si la barre est finie, les températures des points situés sur l'axe ou sur une même ligne parallèle à l'axe, ou enfin les températures moyennes des sections moyennes, suivent la loi donnée pour le cas où la température est la même dans toute la section. Il est difficile d'assigner la longueur que doit avoir une barre d'une substance d'une longueur et d'une épaisseur données, pour que la loi se manifeste; mais si l'expérience montre qu'elle a lieu comme dans nos expériences rapportées plus haut, on pourra se servir des résultats pour la détermination des coefficiens de conductibilité.

Cette loi a été donnée pour la première fois par Lambert, de l'Académie de Berlin (*Pyrométrie*); MM. de Rumford et Biot l'ont confirmée par des expériences.

Je rapporterai une expérience tirée de mon mémoire sur la conductibilité, qui mettra bien cette loi sous les yeux du lecteur. (*Ann. de Ch. et de Phys.*, t. 19.)

L'expérience est faite avec une barre de cuivre carrée; le côté du carré est de 21mm; les thermomètres sont distans de 10 centimètres. Le diamètre des trous dans lesquels sont les thermomètres, est de 6mm; ces trous sont percés jusqu'aux 2/3 de l'épaisseur de la barre. Celle-ci est chauffée par le moyen d'un quinquet. L'emploi du quinquet présente plusieurs avantages; on le gouverne facilement, et il ne porte que peu de chaleur dans le lieu des observations. La température de l'air environnant est indiquée par un thermomètre très sensible. On rend cette température sensiblement constante, condition nécessaire pour que l'expérience soit exacte. La durée de l'expérience est de six heures environ. Il faut deux à trois heures pour que les températures deviennent stationnaires, la source de chaleur conservant une même intensité (*fig.* 139)

RÉSULTATS.

Thermomètres.	Températures.	Excès sur la température de l'air.	Quotient de la somme de deux excès par l'excès intermédiaire.
1er	83°,44	66°,36	2,14
2e	63°,36	46°,28	2,15
3e	49°,70	32°,62	2,11
4e	41°,40	24°,32	2,17
5e	35°,71	18°,63	
6e	33°,26	16°,18	

La température de l'air est égale à 17°,08.

La distance entre deux thermomètres consécutifs étant de 10 centimètres, leurs distances au foyer de chaleur sont en progression arithmétique; les excès de leur température sur celle de l'air forment une série géométrique, car *le quotient des deux termes consécutifs est constant*, comme

on le voit dans la troisième colonne du tableau $\frac{66,36}{46,28} = 1,4$; $\frac{46,28}{32,62} = 1,4$; $\frac{32,62}{24,32} = 1,4$; et ainsi de suite. *Le quotient de la somme de deux excès par l'excès intermédiaire est également constant*, comme le montre la quatrième colonne. 2,14 est le quotient de 66,36 + 32,62 par l'excès intermédiaire 46,28; 2,15 est le quotient de 46,28 + 24,32 par 32,82, et ainsi de suite. *Si les excès de température étaient beaucoup plus considérables, la série exponentielle serait altérée.*

La propagation de la chaleur varie avec les dimensions des corps; la perte de la chaleur étant proportionnelle à l'aire des surfaces extérieures, et la quantité de chaleur qui traverse étant proportionnelle à l'aire de la section, le décroissement des températures est d'autant plus considérable, que le contour est moindre; et, si l'on cherche pour deux barres de la même substance, différentes en épaisseur, les distances du foyer aux deux points, où la température est la même, on trouve *qu'elles sont comme les racines carrées des épaisseurs.* Voilà pourquoi on tient dans la main, sans se brûler, un fil métallique, à quelques pouces du point où il est chauffé au rouge.

Ceux qui voudraient connaître la théorie de la propagation de la chaleur dans toute son étendue, devraient consulter l'ouvrage de M. Fourrier et celui de M. Poisson.

170. Je citerai quelques autres expériences. Les barres avaient les mêmes dimensions que celle de cuivre: on les avait couvertes d'un même vernis, afin de leur donner la même surface rayonnante.

Barre de fer. Température de l'air = 13°,02.

Thermomètres.	Températures.	Excès, etc.	Quotient, etc.
1er	75°,92	62°,90	
2e	49°,71	36°,69	2,34
3e	33°,64	20°,52	2,34
4e	25°,34	12°,32	2,33
5e	21°,21	8°,19	2,31
6e	19°,63	6°,61	

Barre d'étain. Température de l'air = 17°,34.

Thermomètres.	Températures.	Excès, etc.	Quotient, etc.
1er	80°,75	63°,41	
2e	52°,51	35°,17	2,42
3e	38°,86	21°,52	2,36
4e	32°,86	15°,52	

Barre de zinc. Température de l'air = 5°,62.

Thermomètres.	Températures.	Excès, etc.	Quotient, etc.
1er	69°,79	64°,17	
2e	43°,64	38°,02	2,35
3e	31°,05	25°,43	2,20
4e	23°,55	17°,93	

Barre de plomb. Température de l'air = 17°,12.

Thermomètres.	Températures.	Excès, etc.	Quotient, etc
1er	82°,25	65°,13	
2e	46°,54	29°,42	2,72
3e	32°,05	14°,93	2,64
4e	27°,11	9°,99	

171. La série des températures ne satisfait à la loi qu'autant que la conductibilité de la substance est assez grande; ainsi dans le plomb, qui conduit la chaleur cinq fois moins que le cuivre, cette loi est déjà altérée.

Pour qu'on ait une idée du décroissement de la température dans les barres formées par des substances peu conductrices, je rapporterai une expérience faite avec une barre de marbre. Je mettrai à côté une autre expérience faite avec une barre de fer, qui avait sensiblement les mêmes dimensions que celle de marbre. Chaque côté du carré de la barre de fer était 26mm; le côté de la barre de marbre était de 26mm,45.

RÉSULTATS.

Marbre blanc. Température de l'air = 17°,15.

Thermomètres.	Températures.	Excès, etc.	Quotient, etc.
1er	81°,06	63°,91	
2e	23°,23	6°,08	10,83
3e	19°,18	1°,95	3,87
4e	18°,62	1°,47	

Barre de fer. Température de l'air = 22°,92.

Thermomètres.	Températures.	Excès, etc.	Quotient, etc.
1er	87°,04	64°,12	
2e	57°,25	34°,71	2,42
3e	42°,63	19°,71	2,40
4e	35°,44	12°,52	

On voit que les excès des températures de la barre de marbre n'ont aucun rapport avec une suite géométrique.

172. On peut tirer les pouvoirs conducteurs des expériences précédentes. Le calcul donne la relation.

$$\frac{kl}{ks} = \left(\frac{log.\ x}{loge.}\right)^2 (a).$$

k est la conductibilité extérieure, l le contour et s l'air d'une section de la barre, e la base des logarithmes népériens; k la conductibilité intérieure. x se trouve lié au quotient constant q par l'équation $q = x + \frac{1}{x}$; si l'on se borne à chercher les rapports de conductibilité, la relation (a) se simplifie et se réduit à $k = \frac{1}{(log.\ x)^2}$, dans le cas où

l'on prend des barres de mêmes dimensions, et couvertes d'un même vernis.

Ces résultats, sauf celui qui est relatif au platine, ont été confirmés par les expériences de M. James Forbes.

Substances.	Nombres proportionnels à la propriété conductrice.
Or	1000
Platine	981
Argent	973,0
Cuivre	898,2
Fer	374,3
Zinc	363,0
Etain	303,9
Plomb	179,6
Marbre	23,6
Porcelaine	12,2
Terre des fourneaux	11,4

M. Forbes place le platine entre le fer et l'étain ; l'antimoine et le bismuth après le plomb.

173. Ingenhous cherchait les conductibilités (*Journ. de Phys.*, 1789) en recouvrant de cire un cylindre de chaque métal, et en exposant tous ces cylindres à un même foyer. Les pouvoirs conducteurs étaient d'autant plus grands que la partie sur laquelle la cire avait fondu était plus étendue. D'après ces expériences, l'ordre des conductibilités serait le suivant : *argent*, *or*, *cuivre* et *étain* a peu près également conducteurs : *platine*, *fer*, *acier*, *plomb*, beaucoup moins conducteurs que les autres.

174. La grande différence qui existe entre les pouvoirs conducteurs des métaux et des terres n'a pu long-temps échapper à l'observation; mais avant les expériences dont les résultats sont rapportés dans le n° 176, on ne s'était pas occupé de ce sujet avec beaucoup de suite.

175. En général, *les métaux sont de bons conducteurs ; les oxides, les pierres, la porcelaine, les terres, le bois*, sont de très mauvais conducteurs ; le *bois* est un conducteur tellement imparfait, que, dans une expérience où je voulais en comparer la propriété conductrice à celle du fer, *j'ai brûlé une barre de chêne à une de ses extrémités, sans pouvoir l'échauffer à quelques pouces de distance*. Le prisme soumis à l'expérience avait les dimensions de la barre de cuivre dont il a été question plus haut.

MM. Aug. de Larive et Alp. de Candolle, en soumettant à des essais analogues à ceux dont il vient d'être question, plusieurs espèces de bois, ont reconnu que la faculté conductrice est un peu plus grande dans le sens des fibres que dans le sens contraire. (*An. de Chim. et de Phys.*, t. 40, p. 91.)

De la Conductibilité des Fluides.

176. La manière ordinaire de chauffer les liquides n'est nullement propre à faire juger si ces corps possèdent la propriété conductrice; la grande facilité avec laquelle l'uniformité de température s'établit, pourrait être attribuée au transport des molécules. En effet, les molécules inférieures, étant chauffées d'abord, deviennent plus légères et montent en vertu de leur légèreté ; les molécules de la surface, plus froides et conséquemment plus denses, tombent dans le fond du vase, de sorte que, même dans la supposition d'une conductibilité nulle, les mouvemens intérieurs suffiraient pour faire concevoir la facile distribution de la chaleur. L'existence de ces courans se démontre par une expérience très simple. Qu'on remplisse d'eau ordinaire un grand ballon ; qu'on y jette un peu de sciure de bois de chêne, et qu'on place ce ballon sur un foyer, bientôt l'on verra les parcelles de bois, emportées par les courans, descendre et monter rapidement. Plusieurs physiciens, et notamment le comte de Rumford, ont nié la propriété conductrice des liquides.

Murrai a opposé à l'opinion du comte de Rumford des expériences concluantes. Il a placé la boule d'un thermomètre dans le fond d'un cylindre de glace qu'il a rempli alternativement d'huile et de mercure ; puis il a approché un corps chaud de la surface du liquide. Le thermomètre a monté de plusieurs degrés dans l'une et l'autre épreuve. On ne saurait attribuer ici la communication au vase, puisque la glace devait absorber la chaleur, et non la propager ; d'une autre part, les molécules, plus chaudes et plus légères, de la surface ne pouvaient établir de courant. Il faut donc que la chaleur se soit communiquée au thermomètre sans le secours du vase ni de celui des courans. Ces expériences constatent en même temps que le mercure est un conducteur de la chaleur plus efficace que l'huile.

177. La propagation de la chaleur par les gaz doit se faire comme par les liquides. Quand on gêne les mouvemens de l'air par le moyen de corps légers, des plumes, de la laine, on le rend mauvais conducteur. C'est ainsi qu'on fait les convertures d'édredon. Chaque gaz possède un pouvoir refroidissant particulier. L'hydrogène, par exemple, refroidit beaucoup plus vite un corps solide que l'acide carbonique (n° 146); ce qui tient à la plus grande mobilité des particules.

178. On conçoit, d'après ce qui précède, l'efficacité des doubles croisées usitées dans les pays du nord. La chaleur rayonnante du soleil traverse facilement la couche d'air et les vitres; la chaleur obscure de l'intérieur est arrêtée et par la vitre intérieure et par la couche d'air.

On comprend encore l'avantage des habitations en bois sur les habitations en terre et l'avantage de celles-ci sur celle en pierre.

On voit encore pourquoi l'épaisseur d'une cloison en terre devra être plus grande que celle d'une cloison en bois et plus petite que celle d'une cloison

en pierre. La théorie précédente indique pour les épaisseurs le rapport inverse des conductibilités.

Changement d'état des Corps.

179. Les corps, en général, peuvent se présenter sous les trois états : solide, liquide, gazeux. Le soufre par exemple, est solide à la température de la surface de la terre; mais, par une élévation de température plus ou moins grande, on le rend liquide et même gazeux.

Chaque corps change d'état à une température particulière; le soufre devient liquide à 109 degrés, et passe à l'état de vapeur à environ 300 degrés.

La glace fond à zéro et se volatilise à 100 degrés.

La fusion du mercure a lieu à — 39 degrés, et sa transformation en vapeur à + 360 degrés.

Avant 1757, il était universellement admis qu'il suffisait d'ajouter à un corps parvenu à la température de sa fusion une petite quantité de chaleur, pour le faire fondre en totalité. A cette époque le célèbre Black fit voir que cette opinion était fausse, et démontra, par des faits incontestables, qu'un corps solide, au moment de sa transformation en liquide, *absorbe une quantité de chaleur plus ou moins considérable, sans pour cela augmenter;* et que, si, par une circonstance quelconque, le corps liquide repasse à l'état solide, *il abandonne la chaleur qu'il a absorbée pendant sa fusion.*

On appelle *latente* la chaleur qui est absorbée dans le changement d'état d'un corps, et qui ne contribue pas à l'élévation de la température.

180. La glace à zéro exige pour fondre une quantité de chaleur capable de porter de 0 à 75° le poids d'un pareil poids d'eau; en effet, un poids de glace à zéro mis avec un pareil poids d'eau à 75°, le fond et la température du mélange est à 0.

180 *bis*. Si, dans la dernière expérience, au lieu de prendre l'eau à 75 degrés, on la prend, ce qui vaut mieux, à quelques degrés au-dessus de la température du milieu environnant, et qu'on la mélange avec une quantité de glace assez petite pour que celle-ci fonde en totalité et augmente dans sa température, on déduira aisément de la température du mélange le nombre qui exprime la chaleur latente de la glace.

Soient M (1) le poids et T la température de l'eau, m le poids de la glace, t la température du mélange : $m\,t$ représentera la quantité de chaleur prise par l'eau provenant de la fusion de la glace; $M\,(T-t)$ la quantité de chaleur perdue par l'eau chaude. Le premier produit est loin d'être égal au second. Il faut y ajouter la chaleur absorbée par la fusion de la glace. Si x représente le nombre de degrés de la chaleur latente, pour l'unité de poids, $m\,x$ sera la chaleur latente pour le poids m.

(1) M représente le poids de l'eau et de la caisse; voyez la *Méthode des Mélanges*.

On aura donc l'équation $m\,t + m\,x = M(T-t)$, d'où l'on tirera la valeur de x.

181. La chaleur absorbée par la fusion de la glace, ou de tout autre corps solide, doit reparaître quand le liquide reprend son état primitif. Parmi les différentes manières de rendre ce dégagement de chaleur manifeste, la suivante est une des plus simples: prenez un tube de 5 à 6 pouces de longueur, de 2/3 de pouce de diamètre, rempli d'une dissolution de sulfate de soude saturée entre 30 et 40 degrés, et fermé après l'ébullition d'une portion du liquide. Cette dissolution, comme on le verra dans une autre circonstance, peut être agitée sans qu'elle cristallise; mais si l'on brise l'extrémité effilée du tube, à l'instant même elle se prend en masse, et la chaleur dégagée est assez grande pour être sensible au toucher.

De même l'eau, dans le moment de sa congélation, abandonne toute la chaleur que la glace exige pour devenir liquide; c'est ce dégagement continuel de chaleur pendant la congélation de l'eau, qui fait qu'une masse de ce liquide, de quelques kilogrammes, ne se solidifie qu'après avoir été assez long-temps exposée à un froid même très vif.

La grande quantité de chaleur absorbée par la fusion de la glace nous fait concevoir pourquoi des quantités, même peu considérables, de cette matière restent long-temps à l'air sans se fondre, quoiqu'elles soient sans cesse enveloppées d'une atmosphère dont la température surpasse celle de la glace fondante.

182. *Tableau des points de fusion des principales substances.*

Mercure à — 39°			
Glace	0		
Phosphore	40	Potassium	58
Iode	107	Sodium	90
Soufre	109		
Etain	213		
Bismuth	263		
Plomb	322		
Cadmium	400 degrés environ.		

Nitre Potasse Soude Zinc Antimoine Sel marin Chlorure de potassium Chlorure de calcium Verre	à peu près à la température rouge.
Argent Cuivre Or Cobalt Nickel	Forte température rouge.
Plâtre Phosphate de chaux Chrôme Fer Manganèse Poterie commune	exigent les plus hautes températures des forges.
Palladium Platine Urane Titane Cérium Rhodium Osmium Iridium	Chaux Silice ou sable pur Baryte sèche Porcelaine dure Grès
	infusibles au feu des forges.
	fusibles au chalumeau d'oxigène et d'hydrogène.

Si nos expériences sont exactes, un corps liquide ne se solidifie jamais à la température à laquelle le solide correspondant entre en fusion, *même dans l'état d'agitation.*

Le repos favorise l'abaissement ; un mouvement imprimé à toute la masse liquide, n'a pas la même influence pour déterminer le retour à l'état solide, que des vibrations qu'on fait naître, ou un petit cristal qu'on projette dans l'intérieur du liquide (Musschenbroch.)

Une couche d'huile qui recouvre le liquide et qui le sépare de l'atmosphère, retarde aussi le point de congélation. C'est ainsi que M. Gay-Lussac a refroidi de l'eau pure jusqu'à 12 degrés.

Nous avons tenu jusqu'à 28 degrés au-dessous de zéro, ce liquide renfermé dans des tubes thermométriques ordinaires.

La présence d'un sel, d'un acide ou d'un alcali retarde la congélation de l'eau, et d'autant plus que l'une ou l'autre de ces matières se trouve en quantité plus grande dans la dissolution.

Conversion des Liquides en vapeurs.

183. Des phénomènes analogues à ceux que nous venons d'observer dans la fusion des solides vont se présenter dans la volatilisation des liquides.

L'accroissement de la température d'un liquide par la chaleur qu'il reçoit a un terme, qui est la température de l'ébullition ; un liquide quelconque à son point d'ébullition possède une force élastique capable de vaincre la pression à laquelle il est soumis. Ainsi, l'eau à 100 degrés peut soulever le poids de l'atmosphère.

Pendant tout le temps que dure la volatilisation d'un liquide, la température reste constante : toute la chaleur qui arrive n'exerce son action que pour hâter l'évaporation ; plus il arrive de chaleur, plus l'évaporation est abondante ; mais un thermomètre plongé au milieu du liquide indique toujours la même température. Il est bien évident qu'il s'agit ici d'un liquide *homogène*, c'est-à-dire d'un liquide dont la partie qui se volatilise est tout-à-fait la même dans sa composition que celle qui n'est pas encore volatilisée.

L'eau parvenue à 100 degrés, température de son ébullition, sous la pression moyenne de l'atmosphère, exige, pour se volatiliser, une quantité de chaleur capable de porter de zéro à 535 degrés un pareil poids d'eau, si l'on avait un moyen quelconque d'en empêcher l'évaporation, ou bien seulement de zéro à 100° une quantité d'eau égale à 5,35 fois son poids. Pour constater cette propriété de la vapeur, nous mettrons dans une cornue AB (*fig.* 111) de l'eau pure ; nous chaufferons peu à peu cette eau jusqu'à la faire volatiliser, et nous recevrons la vapeur dans un flacon HK contenant 5,35 fois autant d'eau qu'il y en a dans la cornue. Nous verrons après la volatilisation de l'eau de la cornue et sa condensation dans le flacon, le thermomètre plongé dans ce dernier marquer 100 degrés. La vapeur condensée conserve également 100 degrés ; elle n'a donc perdu que la chaleur latente, qui a élevé de 100 degrés 5,35 parties d'eau à zéro, et qui aurait conséquemment élevé de 535 degrés la température d'une partie de ce liquide égale en poids à la vapeur.

184. Cette manière de faire l'expérience est très simple mais peu exacte ; pour déterminer la chaleur latente avec précision, on reçoit la vapeur dans une plus grande masse d'eau froide contenue dans un vase en cuivre : voyez la *fig.* 112 ; AB est le vase qui fournit la vapeur, CD le serpentin dans lequel elle vient se condenser : ce serpentin est entouré d'une quantité connue d'eau ; le poids de la caisse en cuivre est également connu ; mn est un écran qui défend la caisse de l'action du fourneau, et l'ouverture O est destinée à donner passage à l'air de la cornue chassé par la vapeur.

Le calcul pour tirer la chaleur latente est absolument le même que celui qui a été fait pour la glace.

Soient m la masse et T' la température de la vapeur, M la masse et t la température de l'eau froide, T'' la température du mélange ; on obtiendra x, chaleur latente de l'unité de masse de vapeur d'eau, en résolvant l'équation : $m(T' - t') + mx = M(T'' - t)$.

Le premier membre représente la chaleur perdue par la vapeur ; le second, la chaleur gagnée par l'eau.

Je ferai l'application de cette formule à une de mes expériences.

M, ou la masse d'eau froide, est 15956,30 grammes ; la caisse et le serpentin en cuivre pèsent 3107g,3 : la capacité du cuivre rapportée à l'eau étant 0,095, cette masse de cuivre représente 295g,19 d'eau ; ainsi la quantité totale d'eau à chauffer est 16251 gr, 49.

m, ou la masse de vapeur d'eau condensée, est 204gr,8.

La vapeur est à 100°, à l'eau froide de 22°, le mélange marque 29°,58.

La vapeur a perdu 100° — 29°,58, ou 70°,42 de température.

L'eau a gagné 29°,58 — 22°, ou 7°,58.

On déduit de là 531,07 pour la chaleur latente de la vapeur d'eau sous la pression moyenne de l'atmosphère.

Le nombre 535, donné plus haut, est la moyenne de plusieurs expériences analogues. Cette énorme chaleur latente fait concevoir l'emploi de la vapeur d'eau si fréquent aujourd'hui pour le chauffage des ateliers et des bains de teinture, pour la cuisson des comestibles, pour le blanchissage du linge, pour la dessiccation de la poudre, etc. La Bourse de Paris, plusieurs théâtres, sont chauffés par le moyen de la vapeur d'eau.

185. Une question importante et beaucoup agi-

tés dans ces derniers temps est celle-ci : la quantité de chaleur que renferme une vapeur est-elle variable ou constante aux différentes pressions ? Cette question a d'autant plus d'importance qu'elle est liée à la théorie de la chaleur et à celle des machines à vapeur. On peut regarder comme un fait suffisamment démontré par les expériences, que la variation de la quantité totale de chaleur est faible, en sorte que pour les arts on peut admettre que la même quantité de chaleur et conséquemment le même poids de combustible suffit pour réduire une quantité déterminée d'eau en vapeur sous une pression quelconque.

D'après Southern, la chaleur latente serait constante, et la quantité totale croîtrait de la quantité dont s'élève la température. Par exemple, si la quantité totale, sous la pression $0^m,76$ et à la température de 100 degrés, était 635, elle deviendrait 657 à la température 122 sous la pression $0^m,76 \times 2$, ainsi de suite, etc. D'après les expériences de MM. Desormes et Clément sur la vapeur d'eau, d'après mes propres expériences sur la vapeur d'eau, sur celle de l'alcool, de l'éther sulfurique et de l'essence de térébenthine, la quantité totale de chaleur contenue dans une même vapeur serait invariable ; l'élévation de pression et de température n'aurait aucune influence. Ainsi le nombre 635, obtenu sous la pression $0^m,76$ et à 100 degrés, serait encore le même à une pression et à une température quelconques.

Convaincu que les expériences des physiciens français cités plus haut, si elles sont suffisantes pour les applications des arts, ne peuvent nullement servir à établir une loi physique, et que même le mode d'expérimenter de M. Southern, quoique plus susceptible de précision, n'est pas à l'abri du reproche, j'ai repris mon travail et j'ai fait de nouveau beaucoup d'expériences dans lesquelles la température a été portée jusqu'à 160° ; mais la difficulté de faire tenir les appareils m'a toujours arrêté. Cependant je ne peux plus admettre, d'après mes nouvelles expériences, que la chaleur totale de la vapeur soit constante ; mais je la regarde comme croissant avec la température, de telle manière que le nombre de degrés dont s'accroît la chaleur totale serait moindre que celui dont s'accroît la température (1). Ces dernières expériences ont été, il y a quelques années, le sujet d'une discussion à la Société Philomatique. Les pièces dans le calorimètre étaient tellement combinées, que le serpentin condensateur pouvait être enlevé à volonté ; de sorte qu'on avait la possiblité de peser la vapeur volatilisée et la vapeur condensée, ce qui est un avantage. J'ai opéré sur des masses d'eau plus considérables ; le nombre de la chaleur latente a été 540.

(Delaplace, *Mécan. céleste*, liv. 13, *Ann. de Ch. et de Phys.*, t. 18 ; M. Poisson, *Ann. de Chim. et de Phys.*, t. 23 ; M. Navier, même journal, t. 17, ont considéré ce sujet sous un point de vue théorique. Voyez leurs mémoires.).

(1) Pendant cette discussion, qui eut lieu entre M. Clément et moi, M. Dulong interrogé par M. Clément répondit que les expériences non publiées l'avaient aussi conduit à penser que la chaleur totale croît avec la température.

Du Froid par la fusion ou des Mélanges réfrigérans.

186. L'expérience nous a appris que tous les corps solides parvenus à la température de leur fusion exigent, pour prendre l'état liquide, une quantité de chaleur considérable.

La fusion d'un corps ne peut s'opérer que par l'absorption d'une quantité plus ou moins grande de chaleur. Si donc, par une cause quelconque, autre que l'action d'une source directe de chaleur, on détermine un corps à se fondre, il doit prendre aux corps environnans la chaleur nécessaire pour sa fusion, et conséquemment les refroidir.

Ainsi, qu'on mêle une partie de sel marin avec trois parties de neige, le tout devient liquide, et un thermomètre plongé dans le mélange peut s'abaisser jusqu'à 20° au-dessous de zéro. Ici, l'affinité du sel marin pour l'eau détermine la fusion de la glace.

L'effet observé est complexe ; c'est la différence entre la chaleur absorbée par la fusion de la glace et du sel, et la chaleur dégagée dans la combinaison du sel avec l'eau. Quand ces deux quantités se compensent, la température du mélange ne change pas. Si la première quantité l'emporte sur la seconde, il y a production de froid ; dans le cas contraire, il y a dégagement de chaleur.

En général, les corps solides qui ont perdu par la chaleur toute leur eau de cristallisation, et qui ont une grande tendance à se combiner avec l'eau, dégagent de la chaleur par leur mélange avec ce liquide. Tels sont la chaux, la potasse, le plâtre, *calcinés ;* tandis que la plupart des acides, des oxides et des sels, cristallisés, produisent du froid dans la même circonstance. C'est le cas de la potasse, du sulfate de soude, du nitrate de chaux, etc., *cristallisés*.

Exemples de mélanges réfrigérans.

1 Nitrate d'ammoniaque, Eau,	de 10° à — 15°,6.
1 Sel marin, 3 Neige,	de 0° à — 20°.
3 Chlorure de calcium cristallisé, 2 Neige,	de — 20° à — 55°,5.

3 Sulfate de soude cristallisé, 2 Acide nitrique étendu,	de + 10° à — 16°,11.
4 Neige, 5 Acide sulfurique faible,	de — 55° à — 68°,3.

Cet acide sulfurique faible a une composition particulière ; c'est un mélange

de 8 d'acide sulfurique concentré, de 4 d'eau et de 8 d'alcool.

Ce tableau exige quelques développemens.

Le premier mélange produit du froid ; ce froid est le résultat de la fusion du sel et de l'eau de cristallisation qu'il renferme, et qui peut être considérée comme de l'eau à l'état de glace.

Le second mélange est employé fréquemment dans les laboratoires ; c'est à l'aide de ce mélange que les limonadiers font leurs glaces ; le troisième sert à la congélation du mercure.

La raison qui fait que les froids produits par ces mélanges sont limités, est que l'action chimique cesse de s'exercer au delà de certaines limites de température. Par exemple, le sel marin et la neige ne produisent point par leur mélange un froid supérieur à 20 degrés, parce qu'au-dessous de ce point le sel est sans action sur l'eau. Si l'on exposait à un froid de — 20 degrés une dissolution de sel marin, il y aurait séparation de l'eau à l'état de glace, et du sel à l'état solide.

Le chlorure de calcium, au contraire, exerce sur l'eau une action puissante, même à de très basses températures ; c'est pourquoi l'on refroidit préalablement le chlorure et la neige, en les enveloppant d'un mélange de sel et de glace à — 20 degrés.

Il est nécessaire d'observer les proportions indiquées, parce que d'autres pourraient donner des résultats tout-à-fait différens. En effet, qu'on mélange 4 parties de glace avec 1 partie d'acide sulfurique concentré, on obtient du froid, tandis que le mélange inverse (1 partie de glace et 4 parties d'acide sulfurique) produit de la chaleur. Par des tâtonnemens, on trouverait dans quel rapport il faut mêler la glace et l'acide pour ne produire ni froid ni chaleur.

Du froid produit par l'Évaporation.

187. Nous avons vu précédemment que les liquides absorbent une quantité de chaleur considérable dans le moment de leur passage à l'état de vapeur. Si donc, par le vide, ou de tout autre manière, un liquide se volatilise, il doit enlever aux corps environnans, ou à lui-même toute la chaleur qui lui est nécessaire dans son nouvel état. Il paraît que Cullen est le premier physicien qui ait eu des idées nettes sur la production du froid par l'évaporation ; il a bien reconnu que le froid est plus grand dans le vide que dans l'air, parce que l'évaporation y est plus rapide ; qu'il est aussi plus grand par un vent chaud et sec, que par un vent froid et humide ; que les liquides produisent d'autant plus de froid par l'évaporation, qu'ils sont plus volatils. Il est même parvenu à congéler l'eau dans le vide, en plaçant un vase rempli d'éther nitreux dans un autre vase contenant de l'eau. (Cullen, *Essais*, etc.)

188. On doit à Leslie, d'Édimbourg, une fort belle expérience, dans laquelle l'eau est congelée par le froid produit dans l'évaporation d'une portion de ce liquide. Voici la manière de disposer l'expérience : on place sous le récipient d'une machine pneumatique un vase en cuivre très mince qui a la forme d'une soucoupe : ce vase repose par trois pieds sur un second vase en cristal, rempli, en partie, d'acide sulfurique concentré. Le poids de cet acide doit être d'une livre au moins ; on ne met dans la soucoupe qu'une petite quantité d'eau, par exemple, 15 grammes. On fait le vide : l'évaporation a lieu avec une vitesse qui dépend de la température ; comme la vapeur est condensée par l'acide, la volatilisation est continue. Bientôt l'eau restante est assez refroidie pour se congeler. La congélation de l'eau a encore lieu, quand on remplace l'acide sulfurique par d'autres matières hygrométriques, telles que le plâtre calciné, la chaux vive, etc. On a formé ainsi plusieurs livres de glace ; mais jusqu'à présent cette ingénieuse expérience n'a pas reçu d'application en grand.

La tendance à l'évaporation se maintient dans l'eau glacée jusqu'aux plus basses températures ; aussi, quand on place dans l'eau une petite boule de verre remplie de mercure, et que le vide a été fait pendant quelque temps, trouve-t-on le métal congelé. L'expérience est encore plus piquante, si l'on entoure d'avance la boule de mercure d'une certaine quantité de glace, et si on la suspend dans le récipient ; on voit la couche diminuer d'épaisseur, et bientôt le mercure se solidifier (*Ann. de Chim.*, t. 78). On sait d'ailleurs, par une observation ancienne, que la glace, à la surface de la terre, diminue par le vent d'une manière sensible, quoique le froid se maintienne au-dessous de zéro.

Le *maximum* de froid produit par l'évaporation dépend de la température des corps environnans : car, puisque la force élastique de la vapeur va sans cesse en diminuant, ainsi que la vitesse de l'évaporation, il doit y avoir un moment où la chaleur communiquée par les corps environnans égale la chaleur absorbée par la vapeur ; alors le froid a atteint le *maximum*, et il est visible que ce *maximum* est d'autant plus considérable que la température des corps environnans est plus basse : en effet, il résulte d'une expérience de M. Gay-Lussac que la congélation du mercure a lieu avec facilité si l'on a soin d'entourer, dans l'expérience de Leslie, le vase rempli d'acide sulfurique, et la

boule thermométrique, d'un vase rempli d'un mélange de glace et de sel.

189. Nous placerons ici les résultats de plusieurs expériences faites par M. Gay-Lussac sur le froid produit dans l'évaporation à l'air libre.

Le phénomène est ici un peu plus compliqué que dans le vide : d'une part, l'évaporation est retardée par la pression de l'air, puisqu'elle est sensiblement nulle dans un air parfaitement calme; d'une autre part, le froid est nécessairement moindre que dans le vide; pour une température initiale donnée, il est son *maximum*, quand la chaleur absorbée par la production de la vapeur et par le rayonnement du corps est égale à celle que reçoit la surface du corps, et du contact de l'air et du rayonnement des corps environnans.

Pour déterminer le froid correspondant à une température donnée, M. Gay-Lussac fait arriver un courant d'air sec sur un thermomètre recouvert d'un tissu de batiste humide. L'air sort d'un gazomètre à pression constante : il se dessèche par son passage dans un tube rempli de chlorure de calcium, et arrive dans un second tube, où sa température est donnée par un thermomètre sensible ; il vient enfin frapper le thermomètre à surface humide.

L'influence du rayonnement est faible dans ces expériences.

Tableau des résultats.

Température de l'air sec à la pression 0m, 76	Abaissement de température au-dessous de la température de l'air, produit par l'évaporation.	
0°	5,82	
1	6,09	
2	6,37	
3	6,66	
4	6,96	
5	7,27	
6	7,59	
7	7,92	
8	8,26	
9	8,61	
10	8,97	
11	9,37	21 — 13,12
12	9,70	22 — 13,51
13	10,07	23 — 13,90
14	10,44	24 — 14,30
15	10,82	25 — 14,70
16	11,20	
17	11,58	
18	11,96	
19	12,34	
20	12,73	

Le froid produit dans l'air, toutes choses égales d'ailleurs, doit être d'autant plus grand que la densité de l'air est moindre, ce qui, en effet, est conforme à l'expérience. Sous une pression 0m,65, la température de l'air étant de 12°,5, le froid produit par l'évaporation a été de 10°,5 ; dans une autre expérience, la température de l'air étant la même, la pression étant de 0m,50, le froid a été de 12°,0.

Tout ce qui précède est relatif à l'air complètement desséché, de sorte que, dans la nature, le froid est toujours moindre pour une température donnée, que le froid indiqué par la table; car dans les temps les plus secs, l'air contient en général au moins les deux cinquièmes de l'humidité qu'il prend dans l'état de saturation.

Des Vapeurs.

190. Nous n'avons à considérer les vapeurs que sous le rapport de leurs forces élastiques, de leurs densités, et enfin sous le rapport de leur mélange avec les gaz, puisque déjà il a été question, dans les chapitres précédens, de leur dilatation et de leurs chaleurs latentes.

Forces élastiques.

191. La force de ressort des vapeurs est rendue manifeste dans une foule d'expériences; c'est cette force qui détermine le jeu des machines à vapeur, et qui produit un grand nombre de phénomènes importans que nous exposerons dans cet ouvrage.

Voulez-vous démontrer qu'une vapeur quelconque, que la vapeur d'éther, par exemple, possède, à la température ordinaire, une force élastique capable de soutenir une assez forte pression, remplissez presque complètement de mercure un tube barométrique, achevez de le remplir avec un centimètre environ d'éther sulfurique et renversez-le, en tenant le doigt sur la partie ouverte, jusqu'à ce que vous l'ayez plongée dans un bain de mercure. Alors, en étant le doigt, vous verrez le mercure se tenir dans le tube à plus de vingt centimètres au-dessous du niveau auquel il se tiendrait si vous n'y aviez pas introduit d'éther. L'abaissement au-dessous du niveau du baromètre dans ce tube ne peut être attribué qu'à la force élastique de la vapeur, qui presse sur la surface du métal, et l'empêche ainsi de monter à la hauteur qu'il atteint dans le baromètre en vertu du poids de l'atmosphère.

192. Pour obtenir la force élastique d'une vapeur au-dessous du point d'ébullition, on porte, comme l'a fait le premier M. Dalton en 1805 (*Manchester's*

Mém., vol. 5), le tube dont il vient d'être question (*fig.* 114) à différentes températures, et l'on note à chaque fois la hauteur du mercure dans le baromètre et dans le tube renfermant le liquide. La différence est évidemment la valeur de la force élastique de la vapeur. Afin de donner au liquide qui fournit la vapeur une température déterminée, on entoure les deux tubes d'un autre tube plus large plein d'eau très limpide, et dont la température est fournie par un thermomètre sensible à long réservoir; il est même bon, pour que l'expérience soit exacte, que le réservoir du thermomètre occupe toute l'étendue de la partie du tube remplie de vapeur. Il faut remarquer que la différence des deux colonnes de mercure n'est réellement la valeur de la force élastique de la vapeur, qu'autant que par le calcul on a ramené chaque colonne à zéro, comme il sera indiqué à l'article du baromètre.

En faisant cette expérience avec les divers liquides, on reconnaît que chacun d'eux fait, à la température de son ébullition, baisser le mercure dans le tube jusqu'au niveau du bain dans lequel il est plongé. A cette température, chaque liquide donne donc une vapeur dont la tension peut faire équilibre à la pression atmosphérique ou à 0m,76 de mercure environ.

193. Il y a un autre procédé pour déterminer les forces élastiques des vapeurs au-dessous du point d'ébullition. Il est fondé sur ce qu'un liquide en ébullition produit une vapeur dont l'élasticité égale la pression à laquelle il est soumis. On établit la communication entre la cornue qui contient le liquide, et une machine pneumatique; un vase intermédiaire renferme un baromètre qui fait connaître l'élasticité de la vapeur au moment de l'ébullition : un thermomètre, dont le réservoir plonge dans le liquide en indique la température; un réfrigérant convenablement disposé, condensant la vapeur à mesure qu'elle s'échappe de la cornue, empêche le liquide de s'épuiser par l'ébullition, et permet de donner à l'expérience telle durée qu'on désire; on peut d'ailleurs déterminer l'ébullition à une pression quelconque. La *fig.* 115 représente cet appareil. *A* est la cornue, *C* le réfrigérant, *B* le vase intermédiaire, et *K* le tube en plomb qui établit la communication entre tout l'appareil et la machine pneumatique.

Les deux procédés ont été employés par M. Dalton, dans son grand travail sur les vapeurs et les gaz. M. Dulong a employé le second avec la modification du tuyau condensateur. Je m'en suis également servi pour mes expériences sur la loi des forces élastiques des vapeurs.

194. M. Gay-Lussac a proposé un moyen fort simple pour avoir l'élasticité d'une vapeur à zéro et au-dessous, ce moyen consiste à courber le tube barométrique, et à plonger l'extrémité courbe dans un bain de glace ou de mélange réfrigérant (*fig.* 106).

195. Il ne nous reste plus qu'à chercher les forces élastiques des vapeurs au-dessus de la pression moyenne de l'atmosphère.

M. Dalton s'est d'abord servi d'un tube de baromètre recourbé en forme de siphon, dont la partie la plus courte est fermée (*fig.* 107). Il remplit ce tube de mercure à la manière ordinaire, et, après avoir fait sortir un centimètre environ de mercure, il le remplace par le liquide dont il veut examiner la vapeur : puis il incline ce tube en le tenant bien bouché avec le doigt. Le liquide, en vertu de sa légèreté, montant toujours dans la partie la plus élevée, on conçoit très bien la possibilité de le faire parvenir à l'extrémité de la petite branche. M. Dalton ôte alors une partie du mercure; il note la hauteur de ce métal dans les deux branches, et il porte le liquide à diverses températures en plaçant la petite branche dans un cylindre métallique rempli d'eau ou d'huile plus ou moins chaude; il est visible que la force élastique de la vapeur soutient la pression extérieure, plus l'excès du niveau dans la longue branche. L'opacité du cylindre métallique s'oppose à ce qu'on prenne directement la hauteur du mercure dans la plus petite branche, mais on l'obtient en doublant la colonne de mercure qui s'est élevée pendant l'opération au-dessus du niveau primitif dans la plus longue, le mercure ayant baissé dans l'autre d'une égale quantité; cette correction suppose le diamètre exactement le même dans les deux branches, ce qui n'est que rarement vrai dans la pratique. On verse du mercure dans la plus grande branche à mesure qu'on élève la température pour obtenir des forces élastiques plus grandes. M. le docteur Ure de Glascow a fait à ce procédé une légère modification; il introduit la partie fermée dans un ballon (*fig.* 120 *bis*), dont il porte ensuite le liquide à différentes températures. Il est bien entendu qu'il faut ramener chaque colonne à zéro, ce qui n'est pas très facile.

Il est un autre procédé que nous regardons comme plus exact et plus commode. Il consiste à faire bouillir le liquide sous une pression élevée; l'appareil est (*fig.* 116) semblable à celui qui a été employé (*fig.* 115) pour déterminer les forces élastiques au-dessous du point d'ébullition. Seulement le tube *K* va plonger dans une colonne de mercure, et le baromètre est remplacé par un tube *kt* ouvert à ses deux extrémités et plongeant dans le mercure par sa partie inférieure. La force élastique de la vapeur ayant à vaincre la pression extérieure, plus le poids de la colonne *mn* de mercure, pourra être plus ou moins augmentée, selon que cette dernière sera plus ou moins considérable. La force élastique de la vapeur a pour mesure la hauteur du baromètre au moment de l'expérience, plus celle du mercure dans le tube *th* du vase intermédiaire.

Nous avons employé cet appareil dans nos expériences sur la recherche des quantités de chaleur de la vapeur d'eau à diverses pressions.

Table des forces élastiques de la vapeur d'eau entre — 20 et + 100 degrés (1).

DEGRÉS.	TENSION.	DEGRÉS.	TENSION.	DEGRÉS.	TENSION.	DEGRÉS.	TENSION.
— 20	1,333	10	9,475	40	52,998	70	229,07
— 19	1,429	11	10,074	41	55,772	71	239,45
— 18	1,531	12	10,707	42	58,792	72	250,23
— 17	1,638	13	11,378	43	61,958	73	261,40
— 16	1,755	14	12,087	44	65,627	74	278,08
— 15	1,879	15	12,837	45	68,751	75	285,07
— 14	2,011	16	13,630	46	72,393	76	297,57
— 13	2,152	17	14,468	47	76,205	77	310,49
— 12	2,302	18	15,353	48	80,195	78	323,89
— 11	2,461	19	16,288	49	84,370	79	337,76
— 10	2,631	20	17,314	50	88,742	80	352,08
— 9	2,812	21	18,317	51	93,301	81	367,00
— 8	3,005	22	19,417	52	98,075	82	380,08
— 7	3,210	23	20,577	53	103,06	83	398,28
— 6	3,428	24	21.805	54	108,27	84	414,70
— 5	3,660	25	23,090	55	113,71	85	431,71
— 4	3,907	26	24,452	56	119,39	86	449,26
— 3	4,170	27	25,881	57	125,31	87	467,38
— 2	4,448	28	27,390	58	131,50	88	486,09
— 1	4,745	29	29,045	59	137,94	89	505,08
0	5,059	30	30,643	60	144,66	90	525,28
1	5,393	31	32,410	61	151,70	91	545,80
2	5,748	32	34,261	62	158,96	92	566,95
3	6,123	33	36,188	63	166,56	93	588,74
4	6,523	34	38,254	64	174,47	94	611,18
5	6,747	35	40,404	65	182,71	95	634,27
6	7,396	36	42,743	66	191,27	96	658,05
7	7,871	37	45,038	67	200,18	97	682,59
8	8,375	38	47,579	68	209,44	98	707,63
9	8,909	39	50,147	69	219,06	99	733,46
						100	760,00

196. On désirait depuis long-temps une table exacte des forces élastiques de la vapeur d'eau à des températures élevées.

MM. Southern, Taylor, Perkins, en Angleterre, et plus récemment M. Arzberger, à Vienne, se sont occupés de ce sujet important. MM. Arago et Dulong viennent de déterminer avec le plus grand soin les tensions de la vapeur d'eau, depuis 1 jusqu'à 24 atmosphères. Ce dernier travail, que nous allons faire connaître, avait été demandé par le Gouvernement à l'Académie des Sciences.

L'appareil de MM. Dulong et Arago consistait en une chaudière *A* en tôle de plus de 13 millimètres d'épaisseur; la capacité en était de 80 litres environ (*fig.* 119). Cette chaudière avait un orifice *m n* dans la partie supérieure, de 17 centimètres de diamètre. Cet orifice était fermé par une plaque de fer battu de 4 1/2 centimètres d'épaisseur, et percée de plusieurs ouvertures; l'une de ces ouvertures portait un canon de fusil *c* bouché par l'extrémité, qui plongeait dans la chaudière; ce canon, rempli en partie de mercure, renfermait le réservoir d'un thermomètre, dont la tige était recourbée, et renfermée dans un large tube de verre à travers lequel passait un courant d'eau froide; disposition qui permettait de faire la correction de la partie de la tige qui ne participait pas à la température de la chaudière. Deux canons semblables, plongeant à des profondeurs différentes, fournissaient exactement la température de la chaudière.

L'élasticité de la vapeur était obtenue par le moyen d'un manomètre *B* communiquant avec la chaudière par un tuyau *d d'*; ce dernier et le manomètre étaient maintenus à une température constante, par le moyen d'un courant d'eau froide. La chaudière, dans la partie latérale, était enveloppée d'un mur solide, destiné à protéger les observations contre une explosion qu'on pouvait craindre dans ces expériences dangereuses.

Les physiciens cités ont déterminé avec cet appareil les tensions de la vapeur d'eau de 1 à 24 atmosphères (1).

(1) Cette table a été calculée par M. Pouillet, au moyen de la formule $f = 0^m,76 \times 10^{at+bt+ct^3}$ qui a été établie de la manière suivante :

Si l'on représente par *A* le coefficient constant par lequel il faut multiplier une force élastique pour avoir la suivante on aura :

$$f = 0^m,76,\ f_1 = 0^m,76\,A,\ f_2 = 0^m,76\,A^2 \ldots$$
$$f_t = 0^m,76\,A^t.$$

D'où, $\log. f_t = \log. 0^m,76 + t \log. A$.

L'hypothèse d'un coefficient constant n'est pas rigoureusement conforme aux expériences, de sorte qu'il faut remplacer $t \log. A$, par un terme plus composé; la substitution d'un terme de la forme $at + bt^3 + ct^3$

$$at + bt^2 + ct^3$$

conduit à $f_t = 0^m,76 \times 10^{at+bt^2+ct^3}$

M. Laplace a proposé cette formule avec deux termes, M. Biot a montré la nécessité d'y ajouter un troisième terme : f_t est la force élastique à la température t; t est positif au-dessus de 100, et négatif au-dessous; si l'on calcule d'abord les coefficiens a, b, c, pour trois températures, par exemple pour 25, 50 et 75 degrés, et si l'on en substitue les valeurs numériques dans la formule, elle représente alors assez bien toutes les forces élastiques intermédiaires. Il est clair que plus les trois températures qui servent à la détermination de a, de b et de c, seront rapprochées, mieux la formule représentera l'expérience.

(1) Pour rapporter les résultats à des atmosphères entières, il a fallu nécessairement employer une formule d'interpolation. De 1 à 4 atmosphères, MM. Arago et Dulong ont fait usage d'une formule proposée par Tredgold, et qui est $t = 85 \sqrt[6]{f} - 75$; t étant la température en degrés centésimaux, à partir de 0, et f l'élasticité en centimètres de mercure. Au delà de 4 atm. la formule adoptée est $t = \frac{\sqrt[5]{f} - 1}{0,7153}$; t est la température en degrés centésimaux à partir de 100 degrés, en prenant pour unité l'intervalle de 0 à 100, et f l'élasticité en atmosphères de $0^m,76$. MM. Arago et Dulong pensent que les résultats fournis par cette formule ne seraient pas en erreur d'un degré à 50 atmosphères. La formule générale est $f = (a + bt)^c$

Voici la table qu'ils ont formée :

Table des forces élastiques de la vapeur d'eau et des températures correspondantes de 1 à 24 atmosphères d'après l'observation, et de 24 à 50 atmosphères par le calcul.

Élasticité de la vapeur exprimée en atmosphères de 0m,76 de mercure.	Élasticité en mètres de mercure à 0°.	Température correspondante, thermomètre centigrade.	Pression sur un centimètre carré en kilogr.
1	0m76	100°	1k033
1 1/2	1 ,14	112,2	1,549
2	1 ,52	121,4	2,066
2 1/2	1 ,90	128,8	2,582
3	2 ,28	135,1	3,099
3 1/2	2 ,66	140,6	3,615
4	3 ,04	145,4	4,132
4 1/2	3 ,42	149,06	4,648
5	3 ,80	153,08	5,165
5 1/2	4 ,18	156,8	5,681
6	4 ,56	160,2	6,198
6 1/2	4 ,94	163,48	6,714
7	5 ,32	166,5	7,231
7 1/2	5 ,70	166,37	7,747
8	6 ,08	172,1	8,264
9	6 ,84	177,1	9,297
10	7 ,60	181,6	10,33
11	8 ,36	186,03	11,363
12	9 ,12	190,0	12,396
13	9 ,88	193,7	13,429
14	10 ,64	197,19	14,462
15	11 ,40	200,48	15,495
16	12 ,16	203,6	16,528
17	12 ,92	206,57	17,561
18	13 ,68	209,4	18,594
19	14 ,44	212,1	19,627
20	15 ,20	214,7	20,660
21	15 ,96	217,2	21,693
22	16 ,72	219,6	22,726
23	17 ,48	221,6	23,759
24	18 ,24	224,2	24,792
25	19 ,00	226,3	25,825
30	22 ,80	236,2	30,990
35	26 ,60	244,85	36,155
40	30 ,40	252,55	41,320
45	34 ,20	259,52	46,485
50	38 ,00	265,89	51,650

Les déterminations de Southern et de Taylor, dont quelques unes vont jusqu'à 8 atmosphères, s'accordent assez bien avec celles de MM. Dulong et Arago. Celles de M. le professeur Arzberger, qui s'étendent jusqu'à 20 atmosphères (*Bulletin des Sciences technol.*, t. 1, p. 123), et qui ont été faites avec beaucoup de soin, présentent à cette limite une différence de 3 atmosphères. Ce physicien attribue à la tension de 20 atmosphères la température de 222°, qui, d'après les physiciens français, correspond à 23 atmosphères. Il est, en effet, bien difficile qu'on apprécie la pression avec autant d'exactitude par le moyen des soupapes que par l'élasticité de l'air ; la température, dans ces diverses expériences, n'était pas non plus connue avec la même certitude que dans les expériences que nous avons rapportées. (Voyez, pour plus de détails, le travail de MM. Arago et Dulong, *Ann. de Ch. et de Phys.*, t., 43, p. 74.)

197. On avait admis en France que les forces élastiques de toutes les vapeurs sont les mêmes à égale distance des points d'ébullition des liquides qui les produisent. Ainsi, supposons que la vapeur aqueuse à la température de 100 degrés, terme de l'ébullition de l'eau, soit capable de faire équilibre à une pression de 0m,76, qu'elle perde la moitié de sa force par une diminution de 18°, et qu'elle acquière une force double par un accroissement de température égal à 22°,2, résultats que l'expérience fournit : d'après la loi, l'alcool à 78°,7 — 18°, l'éther sulfurique à 35°,5 — 18°, l'essence de térébenthine à 156°,8 — 18°, auraient une force élastique égale à 0m,38, moitié de 0m,76.

Chacun des mêmes liquides à 22° au-dessus de la température de son ébullition aurait une force égale à 1m,52 ou deux fois 0m,76.

Cette loi étant admise, il suffirait d'avoir la table des forces élastiques d'une seule vapeur pour qu'on pût en déduire la force élastique d'une autre vapeur à une température quelconque. Nous supposerons qu'on ait établi cette table pour la vapeur d'eau.

Voudrait-on connaître, par exemple, la force élastique de l'éther sulfurique à 18°,5, de l'alcool à 55°,4? On retrancherait d'abord 18°,5 de 35°,5, température de l'ébullition de l'éther ; on aurait 17 pour différence. On prendrait dans la table l'élasticité de la vapeur d'eau à 100° — 17° = 83° ; on trouverait 0m,398. Ce serait là la force élastique de la vapeur d'éther à 18°,5. L'alcool à 55°,4 se trouve distant de son ébullition de 23°,3 ; on chercherait dans la table l'élasticité de la vapeur d'eau à 100° — 23,3 = 76°,7. On aurait 0m,308 pour la force élastique de la vapeur d'alcool à 55°,4.

Cette loi n'a pas toute la rigueur qu'on lui avait attribuée ; je citerai mes expériences, desquelles il résulte que l'eau, l'alcool, l'éther sulfurique, et l'essence de térébenthine, entrent en ébullition sous des pressions égales, à des températures non équidistantes de leurs points d'ébullition sous 0m,76. Il est évident, d'après cela, qu'à des distances égales de ce dernier point, la force élastique de chacun de ces liquides n'est pas la même.

Pour un intervalle d'une demi-pression, la différence présentée par l'éther sulfurique est d'un degré ; l'essence de térébenthine en présente une de 7 degrés. J'ai pris directement la température d'ébullition de la liqueur des Hollandais ; je l'ai trouvée de 85°,85. Ce même liquide à 12°,17 a une force élastique égale à 0m,0558. Si l'on cherche dans la table de la vapeur d'eau la température à laquelle cette vapeur a une force élastique

égale à 0m,0558, on trouve que c'est à 40°,95. Cette température est à 59°,05 du point de l'ébullition de l'eau : en ajoutant 59°,05 à 12°,17, on devrait avoir 85°,85 si la loi était vraie, et l'on n'a que 71°,22; c'est-à-dire que la différence est de 14°,63. (*Ann. de Chim. et de Phys.*. 1822.)

Le docteur Ure a été conduit à la même conséquence; cependant nous pensons que les expériences de ce savant ne pouvaient infirmer la loi de Dalton, puisque les liquides dont il s'est servi n'étaient pas parfaitement homogènes.

On a lieu de regretter que la loi de Dalton ne soit pas vraie; elle aurait servi à trouver la température de l'ébullition d'un liquide dont on n'aurait possédé qu'une faible quantité. Plusieurs chimistes, à une époque où les expériences que nous venons de rapporter n'étaient pas connues, se sont appuyés sur cette loi pour des déterminations de ce genre, lesquelles sont nécessairement inexactes.

198. Quoiqu'il soit démontré que la loi de M. Dalton sur les forces élastiques des vapeurs n'est pas rigoureusement exacte, ce célèbre physicien n'en a pas moins rendu un service éminent en la faisant connaître, parce que les différences que présentent les résultats déduits de cette loi avec ceux que fournit l'expérience, ne sont pas très considérables. Ainsi, d'après cette loi, l'acide sulfurique, le mercure et les métaux volatils à de hautes températures n'ont, à la température ordinaire, qu'une élasticité inappréciable, ce qui est en effet conforme à l'observation. On a donc la certitude que la colonne de mercure dans le baromètre n'est déprimée que d'une quantité infiniment petite par la vapeur de ce métal.

Il paraît même qu'il existe une limite pour chaque corps, au delà de laquelle il n'éprouve plus d'évaporation, comme le prouvent les faits suivans.

Une feuille d'or placée dans la partie supérieure d'un bocal dans lequel il y a quelques gouttes de mercure blanchit en quelques mois si la température s'élève à 20 degrés environ. Elle n'éprouve aucune altération si la température est voisine de zéro. (M. Faraday.)

Une lame de zinc suspendue dans un bocal au fond duquel il y a de l'acide sulfurique, se conserve intacte, même pendant l'espace de deux ans, à la température de Milan. (M. Bellani.)

199. La présence d'une matière étrangère change le degré de volatilité d'un liquide; ainsi l'eau de mer ne bout qu'à cent et quelques degrés; la potasse, le chlorure de calcium, l'acide phosphorique, etc., peuvent retarder le point de l'ébullition de l'eau de plus de vingt degrés. Jamais une eau qui coule à la surface de la terre ne bout à 100 degrés, parce qu'elle renferme toujours quelques sels qui en augmentent la fixité.

Les nombres que nous avons donnés plus haut pour les températures des points d'ébullition de plusieurs liquides, supposent que ces liquides soient pris dans le plus grand état de pureté.

L'alcool du commerce, qui est toujours mélangé avec plus ou moins d'eau, ne bout qu'à 80 et quelques degrés; l'éther sulfurique ordinaire renferme de l'eau et de l'alcool; aussi n'entre-t-il en ébullition qu'au delà de 40 degrés.

200. Avant de quitter le sujet des forces élastiques, je citerai une remarque fort ingénieuse du R. P. Wollaston; d'après plusieurs expériences faites à Londres il a reconnu qu'un degré de variation dans la température de l'ébullition de l'eau pure correspond à 0m,027 de variation dans la hauteur du baromètre; il résulte de là qu'un thermomètre sensible placé dans un vase rempli d'eau, qu'on transporterait successivement au bas et au sommet d'un lieu élevé, pourrait faire connaître la hauteur du baromètre, si on l'observait dans ces deux stations, et par conséquent servir à la mesure de l'élévation du lieu. Il ne nous paraît pas probable qu'on préfère cette méthode à celle par laquelle on prend directement les hauteurs du baromètre. Cette dernière sera exposée dans les Additions placées à la fin de l'ouvrage.

Densités des Vapeurs.

201. Ce n'est que depuis un petit nombre d'années qu'on connaît avec exactitude les densités de quelques vapeurs, à la pression moyenne de l'atmosphère. On doit à M. Gay-Lussac le procédé par lequel on les détermine. Ce procédé, considéré d'une manière générale, consiste à mesurer le volume de vapeur fourni par un poids donné de liquide. Pour qu'il soit bien conçu, il est nécessaire d'entrer dans les détails de l'expérience. On commence par peser une ampoule de verre, d'abord vide, et ensuite pleine de liquide; on la remplit, en chauffant la boule et plongeant la pointe ouverte dans le liquide : bientôt l'air de l'intérieur se refroidit, se contracte et permet au liquide, pressé par l'atmosphère, d'entrer dans la boule; on répète l'opération jusqu'à ce que la boule soit complètement remplie, sans mélange d'air; on chauffe alors légèrement l'ampoule pour chasser un peu de liquide, et l'on ferme en même temps l'extrémité du tube à la lampe des émailleurs ou à une bougie.

On introduit ensuite cette ampoule dans une cloche graduée *A* (*fig.* 117). Cette cloche a un pied environ de longueur et deux pouces de diamètre; elle est remplie de mercure, et plonge par sa base dans une marmite en fonte, pleine du même métal. Elle est entourée d'un manchon de verre, rempli d'eau et ouvert à ses deux extrémités; la marmite est placée sur un foyer, de sorte qu'on peut élever la température de tout l'appareil. Bientôt la petite ampoule crève, et l'eau qui y était contenue se réduit en vapeur; on continue de chauffer jusqu'à faire bouillir l'eau du manchon (1). A ce moment,

(1) Pour des liquides moins volatils que l'eau on remplirait le manchon d'une huile fixe.

on prend le volume occupé par la vapeur; on note la hauteur du mercure dans la cloche au-dessus du niveau du bain; en la retranchant de la hauteur du baromètre placé dans le lieu des expériences, on a la pression de la vapeur intérieure. Il est bien entendu que chaque colonne de mercure doit être ramenée par le calcul à la température de la glace fondante. On doit aussi ajouter à la hauteur du baromètre la valeur de la petite colonne de liquide du manchon, laquelle pèse sur le bain de mercure.

On s'assure si le liquide est réduit totalement en vapeur. Nous avons vu que tous les liquides ont à leur point d'ébullition une élasticité égale à la pression atmosphérique; si donc il y a un excès de liquide, le niveau de l'intérieur de la cloche sera à la température de l'ébullition de ce liquide à peu de chose près le même que dans le bain; et, en augmentant la température, on verra la vapeur sortir de la cloche; dans ce cas il faudra recommencer l'expérience avec une quantité moindre de liquide. La température de l'appareil doit être au moins égale à celle de l'ébullition du liquide de la vapeur duquel on cherche la densité.

Voyons comment on calcule l'expérience : on compare le poids d'un litre de vapeur au poids d'un litre d'air sec, à $0^m,76$ de pression, et à la température de la glace fondante, lequel est $1^g,299$. Soit V le volume corrigé de vapeur fourni par un poids p de liquide, le poids d'un litre sera $\frac{p}{V}$, et comme les densités sont proportionnelles aux poids sous le même volume, on aura, si l'on représente par l'unité la densité de l'air, et par d celle de la vapeur, la proportion

$$1 : d :: 1,299 : \frac{p}{V}.$$

Le volume tel qu'il est fourni immédiatement par l'expérience doit subir plusieurs corrections relatives à la pression, à la température de la vapeur et à la dilatation du verre.

1° Soit h la hauteur de la colonne de mercure élevée dans la cloche au-dessus du niveau du bain, H la hauteur du baromètre extérieur (1); $H - h$ sera la pression supportée par la vapeur. H et h sont ramenés à zéro. (*Voyez* le *Baromètre*.) 2° Le volume V observé est trop petit, puisque chaque division, par suite de la dilatation du verre, s'est agrandie dans le rapport de 1 à $1 + kt$, k étant le coefficient de la dilatation cubique de la matière de la cloche. 3° Le volume de la vapeur est dilaté dans le rapport de 1 à $1 + 0,00375 \times t$; on aura donc les trois proportions :

$$V : x :: 0,76 : H - h;$$
$$x : x' :: 1 : 1 + kt;$$
$$x' : x'' :: 1 + 0,00375 \times t : 1;$$

ce qui donne pour le volume corrigé l'expression suivante :

$$\frac{V(1 + kt)(H - h.)}{(1 + 0,00375 \times t)\,0,76} \quad (a).$$

202. *Exemple.* Densité de la vapeur d'eau d'après les données des expériences de M. Gay-Lussac :

Poids de l'ampoule pleine d'eau. . .	$1^g,391$
Poids de l'ampoule vide.	$0^g,791$
Poids de l'eau par soustraction. . .	$0^g,600$

Cette quantité d'eau a rempli, à la température de 100 degrés, 220 divisions de la cloche; chaque division valait $0^{litre},005$; la colonne de mercure élevée dans la cloche au-dessus du niveau du bain était de $0^m,052$; le baromètre extérieur marquait $0^m,756$, le coefficient de la dilatation cubique de verre est pour chaque degré centigrade, de 0 100°, $\frac{1}{38700}$

En mettant toutes ces données dans la formule, on trouve qu'un litre de vapeur pèse $0^g,8077$ à la température de la glace fondante, et à la pression $0^m,76$; dans les mêmes circonstances un litre d'air pèse $1^g,299$, et puisque les densités sont en raison directe des poids sous le même volume, on trouve que la densité de la vapeur est 0,622, ou sensiblement les 10/16 de celle de l'air. De la même manière, M. Gay-Lussac a trouvé la densité de la vapeur d'éther, celle d'alcool, de sulfure de carbone et d'essence de térébenthine. Elles sont rapportées dans le tableau ci-joint :

Tableaux des densités.		Poids d'un litre à zéro et $0^m,76$ de pression.
Air.	1,000	$1^g,299$
Vapeur d'eau	0,622	0 ,810
d'alcool.	1,613	2, [illegible]
d'éther sulfurique . . .	2,5[illegible]	3 ,360
de sulfure de carbone . .	2,6[illegible]	3 ,436
d'essence de térébenthine. .	5,013	6 ,515

203. M. Dumas a employé un procédé qui n'a pas l'exactitude de celui qui vient d'être décrit, mais qui a l'avantage d'être applicable aux corps qui n'entrent en ébullition qu'entre 300 et 400 degrés. Il consiste à prendre un ballon de verre dont le col soit effilé, dans lequel on introduit une quantité de liquide supérieur à celle qui serait nécessaire pour remplir de vapeur la capacité du ballon. On chauffe le ballon dans un bain de sable ou d'huile; lorsque la vapeur cesse de se dégager, on ferme au chalumeau l'extrémité effilée; on prend la température du bain, qui est sensiblement celle du ballon; on pèse ce dernier lorsqu'il est revenu à la température des corps environnans et l'on en casse

(1) Dans H est comprise la hauteur de la colonne d'eau du manchon, multipliée par le rapport de la densité de ce liquide à celle du mercure; c'est-à-dire que si h' est la hauteur de la colonne d'eau, $\frac{h'}{13,56}$ sera ce qu'il faut ajouter à la pression extérieure.

la partie effilée sous l'eau. Si tout l'air a été expulsé par la vapeur, le ballon se remplit complètement de liquide. Dans le cas contraire, le ballon ne se remplit qu'en partie d'eau, et on le pèse dans cet état. On le pèse aussi successivement plein d'air et plein d'eau. On a ainsi les données nécessaires pour déterminer la densité cherchée à la température de l'expérience. M. Dumas a ainsi obtenu les nombres suivans :

NOMS DU CORPS.	Densité.	Poids d'un litre.
Vapeur d'iode.	8,716	11,825
Vapeur de mercure.	6 976	9,0625
Proto-chlorure de phosphore. . . .	4.875	6,3562
Hydrogène arsenicé	2,695	3,5023
Proto-chlorure d'arsenic	6,3006	8,1852
Chlorure de silicium.	5,939	7,7154
Acide fluorique silicé	3,600	4,676
Chlorure de bore.	2,942	3,9212
Acide fluoboraique	2,3124	2,998
Per-chlorure d'étain.	9,1997	11,9546
Per-chlorure de titane.	6,836	8,881

204. Il était utile de chercher si les densités des vapeurs sont proportionnelles aux pressions qu'elles supportent : c'est ce que j'ai fait dans un mémoire (*Ann. de Chim. et de Phys.* 1828), pour l'intervalle de 0 à 100 degrés. Le procédé de M. Gay-Lussac donne les densités des vapeurs sous la pression $0^m,76$. Le procédé dont j'ai fait usage les fait connaître aux pressions inférieures. Pour obtenir de la vapeur parfaitement isolée, et à la température des corps environnans, on a un large baromètre à robinet, dont le diamètre est triple de celui des baromètres ordinaires (*fig.* 120), et dans la partie supérieure duquel on introduit le liquide qu'on veut soumettre à l'expérience; on y adapte un ballon parfaitement vide d'air : il est bientôt rempli de vapeur. Un baromètre ordinaire *B* plonge dans le même bain de mercure, de sorte qu'on connaît la force élastique par la différence des hauteurs du mercure dans les deux tubes; enfin, par l'inspection d'un troisième tube de baromètre *C*, renfermant le même liquide, on juge si la force élastique est au maximum, et conséquemment si l'espace est saturé (1). Le ballon qui a été employé pour les expériences avait une capacité de $9^{lit.},3745$ à la température de 15 degrés.

L'eau, l'éther sulfurique et le sulfure de carbone ont été l'objet de ces recherches; on ne rapportera que quelques résultats fournis par le sulfure de carbone.

Ire EXPÉRIENCE. Température de l'air = 15°87.

Poids du ballon vide.	874s,975
Poids du ballon plein de vapeur. . .	883s,162
Poids de la vapeur.	8s,187
Force élastique.	$0^m,1991$

(1) On a douté, dans plusieurs ouvrages français, de l'exactitude de ce procédé; je crois néanmoins qu'il est beaucoup plus exact que tous ceux qui ont été proposés, à l'exception de celui qui a été décrit en premier lieu.

En ramenant par le calcul le poids de la vapeur à zéro, on trouve 8,648.

Le poids du même volume de vapeur fournie par le liquide en ébullition sous $0^m,76$, et ramené à 0° serait de 32s,249.

IIe EXPÉRIENCE. Température de l'air = 14°,78.

Poids du ballon vide.	875s,018
Poids du ballon plein.	880s,212
Poids de la vapeur.	5s,194
Poids ramené à zéro.	5s,486
Force élastique.	$0^m,1272$

Les poids 32s,249, 8s,648, 5s,486, sont proportionnels aux forces élastiques $0^m,76$ $0^m,199$ et $0^m,127$.

De ces expériences, et d'autres analogues, il résulte que les densités des vapeurs ramenées par le calcul à une même température sont proportionnelles aux forces élastiques. M. Southern a fait sur la vapeur d'eau, dans une échelle assez étendue, des expériences qui lui ont fait admettre la proportionnalité des densités aux élasticités, sans la correction de la température. Cette opinion ne paraît pas fondée. Les résultats des expériences que je viens de rapporter sur l'extension de la loi de Mariotte aux vapeurs ne doivent être considérés comme vrais que dans certaines limites.

205. M. Cagniard de Latour a cherché les effets produits sur plusieurs liquides par l'action réunie de la chaleur et de la compression. Il renferme dans des tubes de verre scellés à la lampe, successivement de l'eau, de l'alcool, de l'éther sulfurique, en quantité suffisante seulement pour remplir une partie de leur capacité. Les tubes sont chauffés avec précaution. Le liquide intérieur se dilate d'abord; et, au delà d'une certaine limite d'expansion, où il est loin de remplir toute la capacité du tube, il se réduit en vapeur, sans laisser la plus petite apparence de liquide. En faisant agir les vapeurs par pression sur un volume d'air constant, M. Cagniard a pu connaître la force élastique. L'appareil qu'il a employé est formé (*fig.* 110) d'un tube *ABC* ayant un millimètre de diamètre dans toute sa longueur, et d'un second tube *FDE*, soudé au premier, du diamètre de 45 millimètres; le mercure occupe l'espace *BCDF*, et le liquide l'espace *FDE*; le tube étroit *ABC* est rempli d'air et fait fonction de manomètre.

Voici les résultats auxquels M. Cagniard est arrivé : l'éther sulfurique se réduit en vapeur à la température de 200 degrés, dans un espace moindre que le double de son volume à l'état liquide : il exerce alors une pression de 37 à 38 atmosphères. Porté à la température de 250 degrés, l'alcool se vaporise aussi totalement dans un espace un peu moindre que trois fois son volume à l'état liquide; il fait équilibre à 119 atmosphères. Enfin l'eau, à une température peu différente de celle de la fusion du zinc, prend l'état de fluide élastique dans un es-

pace à peu près quadruple de son volume à l'état liquide.

Pour déterminer le degré de chaleur de l'alcool et de l'éther, M. Cagniard de Latour fait chauffer dans un bain d'huile les tubes qui les renferment.

Ce procédé n'est pas susceptible d'une grande exactitude, l'élasticité et le volume de la vapeur sont mal déterminés; le résultat général ne présente pas moins beaucoup d'intérêt. (*Ann. de Ch. et de Phys.*, t. 21 et 22.)

Il paraît d'abord extraordinaire de voir tant de vapeur renfermée dans un si petit espace. Il faut faire attention que la pression est très considérable, et que d'après ce qu'on sait sur l'accroissement rapide de l'élasticité des vapeurs avec la température, ces résultats ne sont peut-être pas très éloignés de ceux qu'on devrait obtenir.

Nous ferons le calcul pour l'éther sulfurique. Ce liquide bout à 35°,5 sous la pression $0^m,76$. En admettant la loi de Dalton, qui n'est à la vérité qu'approximative, on trouve par la table des forces élastiques de la vapeur d'eau que l'éther doit avoir à 200° une élasticité égale à $48^{atm.},86$. Un litre de vapeur d'éther pèse à zéro 3s,36, à 200° et à la pression $48^{atm.},86$, il pèserait $\frac{3\ 36 \times 48^{atm.},86}{1 + 0,00375 \times 200}$.

Si l'on divise le poids 7155, qui est celui d'un litre d'éther à 0°, par ce poids on a 7,6. Ainsi la vapeur d'éther occuperait un volume qui ne serait pas huit fois le volume du liquide à 0°. Si l'on suppose l'éther porté à 200, le rapport deviendrait encore moindre, il serait 6,7. Le poids 7155 devrait être pris à 4°; cette correction n'apporterait qu'une légère différence.

Dans la marmite Papin, on peut porter la température plus loin que dans les expériences de M. Cagniard-Latour. Cet appareil consiste en un vase cylindrique en bronze, fort épais. Ce couvercle présente une soupape fermée par un lévier (*fig.* 118 *bis*). Quand l'appareil a acquis une température de 150° ou plus, on lève la soupape, il s'en échappe un jet de vapeur qui emporte une grande quantité de chaleur, et le liquide restant se trouve à 100°. On conçoit une température où cet appareil plein de liquide à la température ordinaire, ne renfermerait plus que de la vapeur, laquelle aurait alors la densité du liquide.

Cet appareil sert dans les pharmacies pour chauffer des matières organiques en contact avec l'alcool ou l'éther sulfurique.

On peut tirer de ce qui précède cette conséquence : que les vapeurs suivent, dans certaines limites, la loi de Mariotte, et qu'au delà elles s'en écartent considérablement. Au reste, nous allons voir que la plupart des gaz appelés *permanens* n'obéissent pas à cette loi.

Compression des Gaz.

206. La variation du volume d'une même masse de gaz, correspondante à une variation de pression, suit une loi que Boyle et Mariotte ont découverte. Elle consiste en ce qu'une même masse de gaz occupe des *volumes* qui sont en *raison inverse des pressions* auxquelles elle est soumise. Pour démontrer cette loi d'une manière expérimentale, on prend un tube de verre recourbé (*fig.* 118) du diamètre de ceux qui sont employés pour les baromètres; il faut que la branche la plus courte ait le même diamètre intérieur dans toute sa longueur. La longueur ordinaire de cette branche est de 6 à 8 pouces; celle de la plus grande branche doit être de 6 à 9 pieds. Le tout est fixé sur une planche, qui porte une division adaptée aux deux tubes. On introduit par la partie ouverte *A*, une petite quantité de mercure, de manière que le niveau soit le même dans les deux branches; le volume de l'air de la plus petite branche soutient alors la pression extérieure, puisque les colonnes de même hauteur se font équilibre : si maintenant l'on verse, par la plus grande branche, du mercure de manière que le niveau de ce métal dans la longue branche surpasse celui de la plus courte d'une quantité égale à la pression extérieure, le volume d'air sera réduit à moitié. Si cette différence, par l'addition d'une nouvelle quantité de mercure, est portée à deux fois la pression extérieure auquel cas le gaz de la petite branche soutient trois pressions, le volume de ce gaz sera réduit au tiers, et ainsi de suite. Il faut remarquer que l'air est complètement desséché; que la température ne doit pas changer pendant l'expérience. Le petit tableau ci-joint met la loi sous les yeux du lecteur :

Pressions.	Volumes de l'air
$0^m,76$	100 parties.
$0\ ,76 \times 2$	50
$0\ ,76 \times 3$	35,3
$0\ ,76 \times 4$	25

On a souvent occasion de recourir à cette loi pour ramener un volume donné d'air à une pression constante. Rien n'est plus facile : par exemple, 150 parties d'air sont à la pression $0^m,74$; on demande le volume à la pression moyenne $0^m,76$. On fera la proportion $150 : x :: 0,76 : 0,74$, d'où

$$x = \frac{150 \times 0,74}{0,76} = 146 \text{ parties.}$$

207. On constate de la manière suivante que la loi de Mariotte subsiste au-dessous de la pression $0^m,76$. On choisit un tube gradué *AB* (*fig.* 111 *bis*), et d'un diamètre assez étroit pour que l'ouverture étant tournée en bas, le mercure ne tombe pas; dans cette position la pression supportée par le gaz est égale à *Π*, la pression extérieure, moins la co-

lonne de mercure BD, ou $H - h$; dans la situation opposée, la pression est $H + h$; enfin si le tube est horizontal, le gaz ne supporte que H. Le volume de l'air étant dans les deux premiers cas V et V', on trouvera toujours $V : V' :: H + h : H - h$.

On arriverait au même résultat en renfermant de l'air dans un tube barométrique plongeant dans le mercure. Si l'on enfonçait le tube de manière que le niveau de l'intérieur fût celui du bain et qu'on le soulevât à différentes hauteurs, on verrait le volume d'air varier en raison inverse des pressions. La pression du gaz dans chaque cas serait la pression extérieure, moins la hauteur du mercure dans le tube.

208. Il se présente maintenant deux questions :

1° La loi de Mariotte se soutient-elle à toutes les pressions pour l'air, gaz qu'on emploie dans les éprouvettes des machines, dans lesquelles on a intérêt à connaître la pression; par exemple, dans les machines à vapeur, dans les pompes à condensation, etc., etc. ?

2° Tous les gaz suivent-ils exactement la loi de Mariotte, ou, en d'autres termes, sont-ils également compressibles ?

Les expériences de MM. Arago et Dulong ont récemment résolu la première question.

Voici la description succincte de l'appareil de MM. Arago et Dulong.

Treize tubes de cristal de 2 mètres de longueur et de 5 millimètres de diamètre étaient disposés le long d'un arbre vertical. Ces divers tubes étaient réunis par des viroles métalliques; au-dessus de chaque virole, on avait disposé deux poulies sur lesquelles passaient des cordons attachés par un bout à la virole située immédiatement au-dessous, et portant à l'autre extrémité un vase en ferblanc dans lequel on mettait de la grenaille de plomb en quantité suffisante pour faire équilibre au poids de chaque virole et du tube qu'elle portait : par cette disposition, les tubes inférieurs n'étaient pas plus chargés que les tubes supérieurs. La partie AB de la *fig.* 123 représente ces dispositions.

Un vase en fonte S à trois tubulures, rempli en partie de mercure, communiquait avec les tubes dd', et avec un tube manométrique aa' du même diamètre que les précédens et d'une longueur de $1^m,70$. Un courant d'eau HK entretenait le tube aa' à une température facilement appréciable. La tubulure D recevait une pompe foulante, à laquelle l'eau était fournie par le vase g.

Cette pompe servait à faire monter le mercure dans la colonne $d\,d'$ en même temps que dans le manomètre aa'.

MM. Arago et Dulong ont fait 39 expériences dans l'intervalle de 1 à 27 atmosphères. Elles montrent que l'air suit la loi de Mariotte dans cet intervalle; les savans auteurs de ces recherches pensent que la loi se soutiendrait beaucoup au delà.

MM. Arago et Dulong ayant constaté que le tube ne subissait pas un allongement sensible sous la plus grande pression, en ont conclu que la capacité en restait aussi sensiblement la même. (Voyez, pour plus de détails, le mémoire, *Ann. de Ch. et de Phys.*, t. 43, p. 74.)

Pendant que les académiciens français se livraient à leur important travail, M. Œrstedt, conjointement avec le capitaine Suenson, s'occupait en Suède d'un travail analogue; il a trouvé, en mesurant l'élasticité par une colonne de mercure, que l'air suit la loi de Mariotte jusqu'à 8 atmosphères. Ces deux physiciens ont même étendu leurs observations jusqu'à 60 atmosphères; dans cette seconde série d'expériences, ils pesaient le même ballon en cuivre, d'abord vide, puis plein d'air à diverses pressions; ils ont toujours trouvé des poids proportionnels aux pressions. La pression était mesurée par les poids nécessaires pour fermer la soupape du ballon. Cette soupape était une ouverture fermée par une plaque métallique; sur cette plaque étaient placés des poids, or on sait que $1^k,03$ sur 1 cent. mètre carré équivaut à une pression. On introduisait du gaz dans le ballon par le moyen d'une pompe foulante; il ne restait que l'air, dont l'élasticité égalait la pression extérieure; plus, la pression de la soupape; le reste s'échappait en soulevant la soupape. Ce procédé n'est pas tout-à-fait aussi exact que celui qui vient d'être décrit.

La seconde question a été résolue par nos expériences. Il résulte de ces expériences que les gaz sont inégalement compressibles, et que si l'on compare les divers gaz à l'air atmosphérique, on reconnaît qu'ils sont plus compressibles que ce dernier, du moins ceux que nous avons examinés. L'azote, l'hydrogène, l'oxigène, se comporteraient très probablement comme l'air. L'appareil que nous avons employé se voit dans la *fig.* 124.

Deux éprouvettes A et B, exactement calibrées et remplies, la première d'air atmosphérique, la seconde d'un autre gaz, étaient renfermées dans un tube en verre très épais et plein d'eau; à ce tube était adapté un cylindre en cuivre dans l'intérieur duquel se mouvait un piston en cuivre, qu'on enfonçait plus ou moins pour avoir une pression plus ou moins forte. En faisant toutes les corrections qu'exigent de semblables expériences, et en calculant les pressions par la diminution de volume, on voit que le gaz ammoniacal, l'acide sulfureux, le cyanogène, l'acide hydrosulfurique, etc., donnent des pressions plus fortes que celles que donne l'air. Il est bien entendu que chaque gaz est en contact avec le mercure.

Ce résultat est contraire à tout ce qu'on savait, puisque, dans tous les calculs relatifs aux gaz, ceux-ci sont supposés, d'après la loi de Mariotte, également compressibles.

Pour qu'on puisse se faire une idée de la différence que présentent les résultats calculés avec les résultats de l'expérience, nous rapporterons les pressions fournies par le gaz ammoniacal et par

l'acide hydrosulfurique parfaitement dépouillés d'eau et de matière étrangère, et l'air atmosphérique également pur et desséché.

Pressions indiquées par l'air.	Pressions indiquées par le gaz ammoniacal.
0m,76	0m,76
1 ,819	1 ,850
2 ,582	2, 663
3 ,685	4 ,132

Air.	Gaz hydrosulfurique
0m;810	0m,810
2 ,243	2 ,293
3 ,875	4 ,020
5 ,789	6 ,031
7 ,568	8 ,058
10 ,837	12 ,018

M. OErstedt a trouvé que le gaz acide sulfureux s'écarte de la loi de Mariotte près *du point* de liquéfaction et a admis cette loi pour tous les gaz. Il résulte de nos expériences, au contraire, que ce gaz ainsi que tous ceux que nous avons comparés à l'air atmosphérique donnent, *dans tout le cours* de la compression, une *diminution de volume* plus grande pour une même pression. Nous répéterons ces expériences avec des tubes d'un diamètre très petit, et présentant des renflemens, en sorte qu'il sera facile d'estimer de petites fractions d'atmosphère, même à de hautes pressions.

Liquéfaction des Gaz.

209. M. Faraday est parvenu à rendre liquides, par des pressions plus ou moins élevées, un assez grand nombre de gaz, tels que l'acide sulfureux, les acides hydrosulfurique et carbonique, l'oxide de chlore, l'ammoniaque, le protoxide d'azote et le cyanogène. Tous les liquides produits par la condensation de ces gaz sont incolores, à l'exception de celui qui fournit l'oxide de chlore, et tous sont parfaitement fluides et volatils, et en général ne se solidifient pas par le froid. La première expérience fut faite sur les cristaux de chlore. On sait qu'une dissolution de ce gaz, abandonnée à une température inférieure à 4°,5, laisse déposer des cristaux qui, d'après les expériences de M. H. D. Davy, sont formés par une combinaison de chlore et d'eau. L'illustre savant à qui la chimie doit de si belles conceptions suggéra à M. Faraday l'idée de soumettre ces cristaux à l'action réunie de la chaleur et de la pression. Des cristaux de chlore, desséchés autant que possible, furent introduits dans un tube de verre, qu'on ferma ensuite hermétiquement. A la température de 38°, ils se décomposèrent et donnèrent naissance à deux liquides, dont l'un, de couleur jaune pâle, offrait l'aspect de l'eau; l'autre, d'une couleur jaune-verdâtre, ressemblait au chlorure d'azote; mais on peut le regarder comme du *chlore pur liquéfié*, puisque du gaz chlore, desséché et exposé à une forte compression, donne le même liquide.

Le chlore liquide peut être séparé de l'eau par la distillation, au moyen de la lampe à esprit-de-vin. Il est parfaitement limpide et fluide à 18 degrés au-dessous de zéro; exposé à la pression ordinaire de l'atmosphère, il se volatilise, mais en partie seulement, à cause du froid produit par son évaporation (nº 187).

Tableau des principaux gas liquéfiés.

Acide sulfureux liquide (dté. 1,70)	à —	7°	sous	2 atmosphères.
Chlore	à +	15	sous	4 atm.
Hydrogène sulfuré (dté 0,9)	à +	10	sous	17 atm.
Acide carbonique	à	0	sous	36 atm.
Protoxide d'azote	à +	7	sous	50 atm.
Cyanogène (dté 0,9)	à +	7	sous	3,7 atm.
Acide muriatique (hydrochlorique)	à +	10	sous	40 atm.
Gaz ammoniacal (dté 0,76)	à +	10	sous	6,5 atm.

Chacun des liquides ainsi produits doit jouir, et jouit en effet, d'une grande élasticité; par une élévation subite de température, ils retournent à l'état gazeux avec violence.

On a proposé l'emploi des gaz condensés comme agens mécaniques. M. Brunel a même donné le modèle d'une pompe dont le piston est mis en jeu par l'acide carbonique, alternativement liquifié et gazéfié; mais jusqu'à présent aucune machine de ce genre n'a été établie en grand. (Voyez les *Machines à vapeur*.)

210. Lorsque la découverte importante de la liquéfaction des gaz fut annoncée à la Société Philomatique, je dis que j'avais, six ans auparavant, obtenu de l'euchlorine liquide, en faisant passer ce gaz desséché dans un tube de verre entouré d'un mélange réfrigérant; que le liquide était verdâtre; qu'exposé à une chaleur très légère, il avait produit une détonation semblable à celle d'un coup de fusil, et que le tube de verre avait été réduit en poudre. Peu de temps après, on sut à Paris, par une lettre de M. Faraday, que la détonation de ces sortes de liquides a en effet ces caractères. Depuis cette époque, M. Bussy a liquéfié, par un mélange réfrigérant, le gaz acide sulfureux et d'autres gaz semblables; il a eu l'heureuse idée de faire servir ces liquides très volatils à la production de grands froids. Pour congeler le mercure, par exemple, il suffit de placer sous une machine pneumatique une boule de thermomètre enveloppée d'acide sulfureux liquide et de faire le vide : en quelques minutes le mercure est congelé. Pour faire cette expérience sans détériorer la machine pneumatique, il faut placer l'acide sulfureux dans un ballon, et l'absorber

à mesure qu'il se dégage, par une dissolution de potasse caustique.

M. Thilorier a fait récemment de très curieuses expériences sur l'acide carbonique liquifié. Ce liquide pèse 0,83 à 0. Il se dilate quatre fois plus que l'air, ce qui est bien extraordinaire, si aucune cause d'erreur n'a échappé à l'observateur. L'élasticité de ce liquide augmente depuis 0° jusqu'à 30°, dans le rapport de 36 à 73 atmosphères. Il est insoluble dans l'eau, très soluble dans l'éther sulfurique. Si l'on dirige un courant d'acide ainsi mélangé sur un tube contenant du mercure, on peut congeler en un instant cinquante gr. de ce métal.

Si l'on ouvre le robinet du vase en fonte contenant l'acide liquéfié, et qu'on reçoive le jet dans une fiole ou un verre, l'acide se solidifie et apparaît sous la forme d'un dépôt blanc, floconneux. Ce dépôt peut être tenu dans la main. Il ne se réduit que peu à peu en gaz. Dans la gaséification du liquide on reconnaît, en recevant le jet sur la boule d'un thermomètre à alcool, que la température baisse jusqu'à — 90°.

Il nous paraît probable que tous les gaz liquéfiés se solidifieraient par le vide ou par un courant rapide d'air.

M. Thilorier prépare l'acide carbonique en décomposant du bi-carbonate de soude dans un vase hermétiquement fermé par l'acide sulfurique. Il fait ensuite passer le liquide dans un autre vase par la distillation.

211. La distinction des fluides élastiques en deux classes n'est donc plus admissible qu'entre certaines limites. On avait appelé gaz *permanens* les gaz qui, comme l'air atmosphérique, l'acide carbonique, etc., conservaient leur état gazeux sous toutes les pressions et à toutes les températures ; et gaz *non permanens*, ou *vapeurs*, les fluides élastiques qui perdaient leur état par la compression ou par le refroidissement : tels sont tous les fluides sériformes qui proviennent de la vaporisation de l'eau, de l'alcool, de l'éther sulfurique, etc. Nous venons de voir que des gaz considérés jusqu'à présent comme gaz permanens deviennent liquides par de fortes compressions ou par de grands froids. L'air atmosphérique, les gaz azote, hydrogène, oxigène, sont à peu près les seuls qui n'aient pas encore été liquéfiés, mais il est très probable qu'ils le seront un jour. Quoi qu'il en soit, la distinction peut être admise dans les circonstances ordinaires : ainsi prenez un tube semblable à celui qu'a employé M. Dalton pour déterminer les forces élastiques des vapeurs au-dessus du point d'ébullition ; introduisez-y de l'éther sulfurique, plongez la plus courte branche dans de l'eau chaude, le mercure de la plus grande branche sera bientôt soulevé par la vapeur ; versez alors un peu d'eau froide sur la partie du tube qui renferme la vapeur d'éther, et à l'instant cette vapeur se liquéfiera. Replongez le tube dans l'eau chaude, la vapeur d'éther se formera de nouveau ; mais vous la condenserez si vous ajoutez quelques décimètres de mercure dans la plus grande branche. Remplacez la vapeur d'éther par le gaz acide sulfureux, ou ammoniacal, ou acide hydrosulfurique. Aucun de ces gaz ne prendra l'état liquide sous un accroissement de pression de quelques centimètres de mercure, ou sous un abaissement de quelques degrés dans la température.

Mélange des Gaz.

212. Le mélange des gaz se fait de toute autre manière que celui des liquides ; les liquides se placent dans l'ordre de leurs densités, à moins que l'action chimique ne détermine leur union intime ; les gaz, au contraire, se mélangent indépendamment des densités et de l'affinité. Ce fait est prouvé par une expérience facile à répéter : qu'on réunisse deux ballons, l'un rempli de gaz hydrogène, et l'autre rempli de gaz acide carbonique ; qu'on les place dans la position indiquée par la *fig.* 121, le gaz le plus léger en haut, et le plus lourd en bas ; qu'on examine au bout d'un certain temps le gaz de chaque ballon, on verra qu'il est de même nature, c'est-à-dire composé de mêmes quantités d'acide carbonique et d'hydrogène. Chaque gaz se répand dans tout l'espace comme dans le vide ; cette propriété des gaz dépend de leur porosité et de l'extrême mobilité de leurs particules, etc. Le mélange se fait d'autant plus vite que la différence des densités est plus grande. (Dalton, Berthollet.) Ainsi l'atmosphère doit être homogène, c'est-à-dire composé des mêmes élémens à toutes les hauteurs ; c'est, en effet, ce qui a été constaté.

213. Passons à la recherche de la force élastique d'un mélange de plusieurs gaz, la force particulière à chacun des gaz étant connue. *Les forces élastiques s'ajoutent sans altération dans le mélange des gaz.* 1° Soit un volume V de gaz à la pression P, renfermé dans un vase inextensible ; supposons qu'on y introduise un volume égal d'un autre gaz aussi à la pression P, l'élasticité totale sera $P + P = 2P$. L'introduction d'un troisième volume V, à la même pression P, rendrait la force élastique totale égale à $P + P + P = 3P$. 2° Supposons que le volume étant toujours V pour chaque gaz, les pressions ou les élasticités soient $P, P' P''$, etc. ; la force totale sera $P + P' + P''$, etc., c'est-à-dire égale à la somme totale des élasticités particulières. 3° Dans tous ces calculs, on suppose le vase inextensible ; si le vase était extensible et soumis à une pression constante, le volume s'augmenterait jusqu'au point où l'élasticité du mélange ferait équilibre à la pression extérieure. 4° Si maintenant les volumes, au lieu d'être tous égaux à V, étaient V', V'', V''', etc., différens de V, il faudrait calculer la force élastique de chaque gaz d'après la loi de Mariotte : par exemple, si l'élasticité corres-

pondante au volume V' était P', on aurait l'élasticité de ce gaz introduit dans le volume V, par la proportion $V : V' :: P' : x = \frac{V' P'}{V}$. L'élasticité du mélange serait donc $P + \frac{V' P'}{V}$, après l'introduction du volume V' dans le volume V. Elle deviendrait $P + \frac{V' P'}{V} + \frac{V'' P''}{V}$, après l'introduction du volume V'', et ainsi de suite. L'expérience confirme tous ces résultats.

Mélange des Gaz et des Vapeurs.

214. Dans le mélange d'une vapeur et d'un gaz, *la force élastique de la première s'ajoute à celle du gaz.* Ce fait important, découvert par M. Dalton, peut se démontrer de plusieurs manières. Nous prendrons le second appareil (*fig.* 126) proposé par M. Gay-Lussac. Cet appareil est formé d'un tube de verre cylindrique AB, divisé en parties de capacité égale, et muni d'un robinet à son extrémité inférieure. A quelques lignes au-dessus du robinet est adapté un tube de verre recourbé $C D$, de 2 à 3 lignes de diamètre. On remplit de mercure récemment bouilli l'appareil séché avec soin. Cela fait, on introduit de l'air sec par le tube latéral. Pour cela on adapte au tube latéral un tube rempli de chlorure de calcium, et l'on renverse l'appareil. On ramène l'air à la pression ordinaire, soit en ouvrant le robinet inférieur pour laisser écouler du mercure, si la pression intérieure est trop forte, soit en versant du mercure par le tube latéral, si la pression est trop faible. On estime le volume V d'air sec. Pour introduire le liquide, on remplit le tube latéral de mercure, à 3 lignes près. On remplit l'espace vide avec le liquide, puis on renverse l'appareil pour le faire passer dans le tube AB.

La force élastique du mélange intérieur est maintenant plus forte que la pression extérieure. Le niveau de la petite branche est au-dessus de celui de la grande; on laisse écouler du mercure par le robinet inférieur jusqu'à ce que le niveau soit rétabli. Nous supposons toujours que, malgré l'accroissement de volume, il y ait du liquide en excès; on le reconnaît en en introduisant une nouvelle quantité; s'il y en a un excès, l'addition de cette nouvelle quantité ne forme pas de vapeur et n'accroît pas l'élasticité du mélange. Il ne s'agit plus que de trouver la force élastique de la vapeur qui s'est formée dans le gaz.

La force élastique du gaz était au commencement de l'expérience égale à la pression extérieure, que nous représenterons par H; le gaz occupait alors un certain nombre V de divisions du tube. Il en occupe maintenant un plus grand V'; la force élastique en a changé, d'après la loi de Mariotte, en raison inverse des espaces V et V' : elle est donc actuellement $\frac{V H}{V'}$. On connaît, par les tables, la force élastique de la vapeur dans le vide à la température de l'expérience; représentons-la par f. Si elle est la même dans les gaz, elle doit satisfaire à l'équation $\frac{V H}{V'} + f = H$. C'est ce qu'on trouve en effet. Il résulte de là qu'une vapeur, *en se mêlant à un gaz, conserve la tension qui lui est propre;* ainsi, dans le mélange des gaz et des vapeurs, comme dans le mélange des gaz entre eux, chacune des parties conserve la force élastique qu'elle posséderait si elle était isolée à la température de l'expérience et sous le volume actuel. Nous avons, pour la simplicité du calcul, ramené le mélange à la pression extérieure, mais nous serions arrivés à la même conséquence, quelle que fût l'élasticité du mélange.

215. Proposons-nous maintenant plusieurs questions qui se présentent fréquemment dans les recherches de physique et de chimie.

Par exemple, un volume de gaz sec étant donné à la pression H, on demande le changement qu'il éprouvera si l'on y introduit un liquide dont la vapeur à la même température ait une force élastique f. On voit que le vase doit être extensible, sans quoi il n'y aurait pas de question. Le gaz augmentera de volume jusqu'à ce que son ressort, affaibli par la dilatation, ajouté à la force élastique de la vapeur, fasse équilibre à la pression extérieure H. Quand le gaz cessera de s'étendre, la force élastique du mélange sera égale à H; celle de l'air dilaté sera donc $H - f$; mais les forces élastiques des gaz sont en raison inverse des volumes. On aura donc la proportion $V : x :: H - f : H$, d'où $x = \frac{H.V}{H - f}$ pour le volume.

Si $H = 0^m,76$, $f = 0^m,22$, $V = 50$ parties du tube, on aura $x = 70,37$ parties.

Le problème serait un peu plus compliqué si la température changeait, ainsi que la pression (1).

(1) Soit un volume V d'un mélange de gaz et de vapeur à la température t, à la pression H, on demande ce qu'il deviendra à la température t et à la pression H', l'air étant toujours saturé.

Nous représenterons par f et f' les forces élastiques de la vapeur aux deux températures t et t'. Les forces élastiques correspondantes de l'air sec seront $H - f$ et $H - f'$. Mais nous savons que les volumes sont en raison inverse des forces élastiques : nous aurons donc

$$V : x :: H' - f' : H - f, \text{ d'où } x = \frac{V(H - f)}{H' - f}$$

Pour tenir compte du changement de température, il faut se rappeler (n° 102) que si la température t d'une

216. Il est souvent utile de savoir reconnaître, par le secours du calcul, si le changement d'élasticité d'un mélange renfermé dans un vase inextensible est l'effet de la température. Ce cas se présente surtout dans les recherches sur la respiration des plantes et des animaux. La solution de cette question dépend uniquement des principes précédens. Soit un vase entièrement fermé et supposé inextensible (*fig.* 122); soient H la force élastique ou le ressort du mélange indiqué par un baromètre, et t la température; on observe, après une expérience, que la première est devenue H', la seconde t'.

Il n'est pas nécessaire ici de tenir compte de la variation du volume, puisque le volume est resté le même; mais il faut remarquer que si la température d'un gaz contenu dans un vase inextensible change, l'élasticité change exactement en raison directe du volume que ce gaz aurait pris par l'effet de la nouvelle température. Ainsi, si ce volume devait devenir double par l'élévation de température, la force de ressort deviendrait double, le volume restant le même. Quand la température du mélange était t, la force élastique de la vapeur f, celle du gaz sec était $H - f$. La température passant de t à t', cette force est devenue $(H - f)\frac{1 + at'}{1 + at}$. En ajoutant à cette quantité la force élastique f' de la vapeur à la nouvelle température, la somme $(H - f)\frac{1 + at'}{1 + at} + f$ devra être égale à H', s'il n'y a eu ni absorption ni dégagement de gaz; dans le cas contraire, il y a eu absorption ou dégagement, selon que H' est plus petit ou plus grand que la somme dont il s'agit.

Application numérique.

Température initiale :	15°.
Hauteur du manomètre :	0m,772.
Force de la vapeur élastique à 15° :	0m,0128.
Température finale :	21°.
Élasticité du mélange :	0m,778.
Force élastique de la vapeur :	0m,0183.

En effectuant les calculs, on trouve $(H - f) \times \frac{1 + at'}{1 + at} = 0{,}7592 \times \frac{1{,}07875}{1{,}05625} = 0^m{,}77537$. Ajoutant à cela la force élastique de la vapeur $f' = 0^m{,}0183$, on a $0^m{,}79367$. S'il n'y avait eu ni dégagement ni absorption de gaz dans le courant de l'expérience, on devrait trouver la pression $H' = 0^m{,}778$ indiquée par le manomètre; or, on trouve une pression plus forte, il y a donc eu absorption. Si le résultat calculé avait été plus faible que la pression observée, c'est qu'il y aurait eu dégagement (1).

On pourrait se proposer d'autres problèmes, qu'on résoudrait avec la même facilité.

217. Tout ce qui précède est encore vrai aux températures supérieures à la température ordinaire. Il est bien entendu que les vapeurs doivent être sans actions chimiques sur les gaz avec lesquels on les mêle, comme cela a lieu pour un mélange de vapeur d'eau, de vapeur d'alcool, d'éther, avec l'air atmosphérique, l'hydrogène, l'azote ou l'oxigène; mais il n'en serait plus de même pour un mélange de gaz ammoniacal et de vapeur d'eau, de gaz hydrochlorique et de vapeur d'alcool, parce que l'action chimique s'exerce ici avec une grande énergie.

masse de gaz devient t', le volume change dans le rapport de $1 + at$ à $1 + at'$, a représentant le coefficient de la dilatation des gaz; ainsi la formule générale sera

$$x = \frac{V(H - f)(1 + at')}{(H' - f')(1 + at)} \quad (a).$$

Application. Un volume d'air humide est de 55 lit., 37 à la température de 15°, et à la pression 0m, 73. On demande ce que deviendra ce volume à la température de 25°, et à la pression 0m, 78, sachant que la force élastique de la vapeur d'eau à 15° est de 0m, 0128 et à 25° de 0m,0231.

On trouve, en raisonnant sur ces nombres comme sur la formule, que le nouveau volume est

$$\frac{55{,}37 \times 0{,}7172\,(1 + 0{,}00375 \times 25)}{0{,}757\,(1 + 0{,}00375 \times 15}, \text{ ou } 54^{\text{lit.}}, 33.$$

On rendrait le problème un peu plus compliqué en y faisant entrer les densités d et d' de la vapeur. Si dans les limites des températures t et t' la loi de Mariotte est vraie, on aurait $\frac{d'}{d} = \frac{f'}{f} \times \frac{(1 + at)}{(1 + at')}$. Cette équation multipliée par l'équation (a) on aura $\frac{V'\,d'}{V\,d} = \frac{(H - f)f'}{(H' - f')f}$.

Si la quantité d'eau était suffisante ou plus que suffisante pour saturer le gaz, c'est-à-dire si l'on avait $Hf' = H'f$ ou $Hf' < H'f$, la formule (a) serait applicable. Dans le cas où $Hf' > H'f$ ou $V'\,d' > V\,d$ elle ne le serait pas, il faudrait employer la formule générale des gaz $\frac{V'}{V} = \frac{H(1 + at')}{H'(1 + at)}$

(1) Nous avons supposé le vase inextensible : mais il est facile de tenir compte du léger changement de volume qu'il subit; en effet, K étant le coefficient de la dilatation du verre, le ballon s'est dilaté dans le rapport de $1 + Kt$ à $1 + Kt'$. La force élastique de l'air sec a donc diminué dans le rapport de $1 + Kt'$ à $1 + Kt$, et conséquemment au lieu d'être comme ci-dessus $(H - f) \times \frac{1 + at'}{1 + at}$, elle est $(H - f)\left(\frac{1 + at'}{1 + at}\right)\left(\frac{1 + Kt}{1 + Kt'}\right)$.

De l'Évaporation.

218. Un liquide exposé à l'air se dissipe avec plus ou moins de facilité ; c'est là ce qu'on nomme évaporation.

La présence de l'air ralentit l'évaporation, mais ne modifie nullement la quantité définitive de vapeur que peut admettre un espace ; que cet espace soit vide ou plein d'air, *il admet à une même température la même quantité de vapeur :* c'est ce qui résulte des expériences citées plus haut (nº 213), lesquelles nous ont appris que la force élastique d'une vapeur est la même dans le vide que dans un gaz quelconque; déjà Saussure avait démontré dans son Hygrométrie que le maximum de vapeur qui se forme dans un espace ne dépend que de la température.

L'obstacle qu'oppose l'air à la diffusion de la vapeur est mis en évidence par une expérience de Fontana. Cet habile physicien remplit d'eau en partie deux cornues, à chacune desquelles il adapta un ballon ; il fit le vide dans l'un des appareils, et laissa l'air dans l'autre; puis, chauffant lentement chaque cornue, il vit bientôt que la vapeur s'était condensée dans le ballon vide, tandis que l'évaporation dans le vase plein d'air avait été très faible. Il est utile de faire plonger chaque ballon dans une terrine remplie d'eau froide.

Ainsi, il n'y a de différence entre l'évaporation dans l'air et celle qui a lieu dans le vide, qu'en ce qu'elle est lente dans le premier, et rapide dans le second.

219. Considérons maintenant la résistance qu'oppose l'air libre à l'évaporation ; supposons d'abord ce fluide en repos et placé au-dessus de la surface d'une masse d'eau à la température ordinaire. La vapeur d'eau s'introduira d'abord entre les particules de la première couche d'air en contact avec le liquide; mais les particules de la seconde couche doivent s'opposer à son ascension (*fig.* 126) ; de sorte qui si le calme est parfait, l'évaporation sera extrêmement lente. Jamais ce cas ne se présente dans la nature; l'agitation de l'air est toujours plus ou moins grande : elle favorise singulièrement l'évaporation, et à tel point que celle-ci aurait la même rapidité dans un air très agité que dans le vide. Pour s'en convaincre, qu'on prenne un linge mouillé, qu'on le fasse tourner avec force à l'extrémité d'une fronde, et il suffira d'un petit nombre de tours pour le dessécher complètement. On pourrait peut-être même faire une application de ce fait à la dessiccation du linge en grand.

Une circonstance qui affaiblit l'évaporation à l'air libre, c'est que jamais ce fluide n'est dépourvu d'humidité ; dans les temps les plus secs, il renferme toujours au moins les deux dixièmes de l'humidité qu'il peut contenir ; et, toutes les autres circonstances étant les mêmes, on conçoit que l'évaporation sera d'autant moindre que la quantité d'eau contenue dans l'air approchera plus de la quantité qui produit la saturation.

220. Pour compléter l'histoire de l'évaporation, nous rappellerons les principales idées des physiciens sur la formation de la vapeur et sur son mode d'existence dans l'air.

En 1751, Musschenbroch, physicien hollandais, avait assimilé la diffusion de la vapeur dans l'air à la dissolution des sels dans l'eau. Leroi, de Montpellier, développa cette théorie. Elle fut d'autant mieux accueillie qu'elle tendait à faire rentrer ce phénomène inexpliqué sous la puissance de l'attraction. Leroi crut voir que l'air dissout l'eau de la même manière et avec les mêmes circonstances que ce liquide dissout les sels. Ainsi, de même que l'eau, en s'échauffant, devient capable de dissoudre une nouvelle quantité de sel, et abandonne, par le refroidissement, une partie de celui qu'elle a dissous, de même l'air, à mesure qu'il s'échauffe ou se refroidit, exige plus ou moins de vapeur pour son maximum de saturation. Le fait de l'accroissement de la quantité d'eau que peut contenir l'air à mesure que la température s'élève, est vrai, mais les conséquences qu'en tire Leroi ne sont pas exactes. L'affinité de l'air pour l'eau ne joue aucun rôle dans l'évaporation; car nous savons, depuis Saussure, que la quantité d'eau que peut admettre un espace est la même, que cet espace soit vide ou plein d'air : la cause productrice de la vapeur, c'est la chaleur, et cette vapeur se répand dans l'air indépendamment de toute action chimique.

On pourrait se demander comment la vapeur se soutient dans l'air à la température ordinaire où elle n'a que quelques millimètres de tension; il faut remarquer qu'elle ne supporte qu'une partie de la pression proportionnelle à sa tension. Ainsi elle est en quelque sorte protégée par les molécules aériennes.

221. Il ne sera peut-être pas déplacé de dire quelques mots de l'action des liquides sur les gaz non solubles.

L'expérience a montré qu'il existe toujours un rapport constant entre la densité des gaz non dissous et celle des gaz dissous, ou, en d'autres termes, que la quantité des gaz dissous par un liquide est proportionnelle à la pression ou à la densité du gaz non dissous, ou enfin que le volume du gaz dissous ramené à la pression du gaz non dissous, est toujours une même fraction du volume du liquide : cette fraction varie pour chaque gaz. S'il y a plusieurs gaz en contact avec le liquide, chaque gaz se comporte comme s'il était seul, eu égard à la pression particulière à laquelle il est soumis.

Par exemple, l'air étant en contact avec l'eau, la pression atmosphérique étant H, l'oxigène entrant pour 21/100 dans l'air, et l'azote pour 79/100, la pression du premier sera 21/100 H, et celle du deuxième 79/100 H.

Si le gaz en contact avec le liquide a un volume indéfini comme l'atmosphère, la densité de ce

gaz ne change pas par la dissolution d'une partie.

Si le volume des gaz est limité on peut très bien, par ce qui précède, calculer pour chacun la quantité absorbée. En effet, soient V le volume des gaz, V' le volume du liquide; d, d' d''... les densités des gaz dans le mélange avant la dissolution : x, x' x''.... les densités après la dissolution; m le rapport fractionnaire entre la densité du premier gaz dissous et celle de ce gaz non dissous; m' le rapport analogue pour le second, ainsi de suite, on aura les équations :

$$Vd = Vx + V'mx; \quad Vd' = Vx' + V'm'x''....$$

Chaque équation donne la densité du gaz non dissous, et par suite la densité du gaz dissous.

Quand dans les laboratoires de chimie on veut conserver du gaz hydrogène pur ou tout autre gaz peu soluble, on ne le laisse pas en contact avec l'eau, parce que l'air dissous dans ce liquide se dégagerait et l'hydrogène se dissoudrait pour satisfaire à la constance du rapport dont il a été tout-à-l'heure question, en sorte qu'au bout d'un certain temps l'hydrogène serait mêlé de beaucoup d'air.

Il faut bien se rappeler qu'il ne s'agit ici que des gaz peu solubles, c'est-à-dire des gaz dont l'eau ne prend qu'une fraction de son volume.

222. Avec quelle rapidité se fait l'évaporation dans un air calme aux diverses températures? M. Dalton est arrivé à ce résultat, savoir : que la quantité d'eau évaporée est sensiblement proportionnelle à la tension de la vapeur, depuis la température de l'ébullition jusqu'à 58°, 8.

Cette tension étant à ces températures beaucoup plus grande que celle de la vapeur que renferme l'air, cette dernière ne peut avoir qu'une très légère influence. Par exemple, à la température de 11 degrés, la tension de la vapeur au maximum n'est que 10^{mm}, c'est-à-dire 1/76 de celle qui répond à l'ébullition.

223. Le même physicien, pour apprécier l'influence de l'humidité de l'atmosphère, a répété à de basses températures les expériences que nous venons de rapporter; et il a reconnu que, dans les mêmes circonstances de repos ou d'agitation de l'air, la quantité de liquide évaporé est constamment proportionnelle à $f - f'$, c'est-à-dire à la quantité d'eau qui manque à l'air pour la saturation complète.

M. Dalton a encore porté son attention sur la vaporisation des liquides différens de l'eau, et le résultat de ses recherches est à peu près celui auquel devaient conduire les conditions d'indépendance reconnues dans le mélange des substances aériformes. Ainsi, il a trouvé que la vaporisation de l'alcool est proportionnelle à la tension de la vapeur à la température où l'on fait l'expérience.

Tous ces résultats ne doivent être considérés que comme approximatifs, à cause de la dilatation de la vapeur.

DE L'HYGROMÉTRIE.

224. L'*hygrométrie* est la partie de la physique dans laquelle on recherche les différens degrés d'*humidité* de l'air. Les instrumens employés à cet effet sont appelés *hygromètres* ou *hygroscopes*.

Dans les temps où l'air paraît le plus sec, il renferme beaucoup de vapeur. Pour rendre celle-ci manifeste, on n'a qu'à placer dans l'air un vase rempli d'un mélange réfrigérant, en quelques minutes la vapeur se déposera à l'état de glace sur les parois du vase : un verre rempli d'eau froide la précipiterait à l'état liquide.

225. Voyons comment on détermine les quantités de vapeur que contient l'air dans différentes circonstances. Dans le cas de la saturation complète, la table des tensions de la vapeur d'eau suffirait pour les trouver. Supposons, par exemple, que la température soit de 11°, d'après la table (p. 88), la force élastique de la vapeur à cette température est $0^m,010$; un litre d'air à cette dernière pression pèserait 10/760 ou 1/76 de $1^g,229$ poids d'un litre d'air sous la pression $0^m,760$ et à zéro ou $0^g,017$. Mais la densité de la vapeur d'eau à égalité de pression n'est que les 10/16 de celle de l'air; il faudrait donc réduire ce poids dans le rapport 10/16, ce qui donnerait $0^g,0106$. Il faut encore ramener le poids de l'air à la température de l'expérience, c'est-à-dire diviser $1^g,299$ par le nombre $1 + 0,00375 \times t$; 0,00375 étant le coefficient de dilatation des gaz, et t la température de l'air.

226. On peut toujours par des expériences directes, déterminer la quantité absolue de vapeur contenue dans l'air pris sous un volume donné, quel que soit le degré de saturation. Pour cela on met ce fluide en contact avec un poids connu de chlorure de calcium, de chaux ou de toute autre matière très avide d'eau. Ce procédé est susceptible d'une assez grande précision. Nous verrons d'ailleurs qu'avec la connaissance du degré de l'hygromètre et du thermomètre on parvient au même résultat.

Toutes les substances exposées à l'air libre varient dans leurs dimensions et dans leurs poids : ainsi, les cordes à boyaux employées dans les instrumens de musique changent de tension et de ton; le papier, le parchemin perdent leur élasticité; les barbes de certaines graminées, les cheveux lessivés, éprouvent des changemens considérables; le verre lui-même augmente de poids d'une manière bien sensible, comme Fontana et M. Gay-Lussac l'ont constaté. Ces divers corps peuvent servir à la construction des hygromètres. Nous décrirons avec détails l'hygromètre de Saussure, qui est le plus employé de tous les instrumens de ce genre.

227. La partie principale de l'hygromètre de Saussure est un cheveu; mais le cheveu dans l'état naturel est recouvert d'une matière grasse. Soumis dans cet état à l'action de l'humidité, il éprouve des variations irrégulières; il faut donc le préparer. Après avoir fait choix des cheveux les plus doux, on en forme un paquet de la grosseur d'un tuyau de plume; on les tient pendant vingt à trente minutes dans de l'eau bouillante contenant un centième de carbonate de soude; ils sont ensuite lavés et séchés. Ils doivent être doux, transparens, brillans. La dilatation des cheveux bien préparés est de 1/50 en longueur depuis la sécheresse extrême jusqu'à l'humidité extrême, tandis que ceux qui n'ont pas été dépouillés de leur matière grasse ne se dilatent que de 1/200.

Le cheveu ainsi préparé est fixé à sa partie supérieure par le moyen d'une pince *d* (*fig.* 126 *bis*), et roulé à la partie inférieure autour d'une poulie; à cette poulie est attachée une aiguille dont les mouvemens sont mesurés sur un cercle gradué *ab*. Il est tenu vertical par un contrepoids *g* de 15 centigrammes environ, suspendu à un fil de soie enroulé sur le même cylindre; quand par l'absorption d'une petite quantité d'eau de l'air, le cheveu s'allonge, le contre-poids fait tourner le cylindre et par suite marcher l'aiguille; au moyen de cette disposition, une variation très petite dans la longueur du cheveu devient sensible par le mouvement beaucoup plus considérable qu'elle occasione dans l'aiguille.

228. Pour rendre comparables tous les hygro-

mètres construits sur les mêmes principes, Saussure prend deux termes fixes, dont l'un est celui de l'extrême humidité, et l'autre celui de l'extrême sécheresse. Il détermine le premier en plaçant son hygromètre sous un récipient de verre plongeant dans l'eau et dont il mouille les parois; l'air sous ce récipient est nécessairement saturé. Le cheveu s'allonge, et au bout d'une heure il est arrivé à l'humidité extrême. Saussure marque 100 le point où s'arrête l'aiguille. Il porte ensuite l'instrument sous une autre cloche aussi petite que possible; il prend un morceau de tôle de fer, qui occupe toute la hauteur et la moitié de la largeur de la cloche; il la couvre de carbonate de potasse et la chauffe jusqu'au point de la faire rougir; alors il la laisse refroidir assez pour que son contact n'occasionne pas la rupture de la cloche; il place cette tôle ainsi garnie sous la cloche avec l'hygromètre, qu'il laisse dans cette position jusqu'à ce que l'aiguille soit stationnaire. Au moment où il est renfermé avec le carbonate de potasse, l'hygromètre marche au sec avec une grande rapidité, au point de faire vingt-cinq degrés dans les dix premières minutes; mais peu à peu la marche se ralentit, et sur la fin l'aiguille fait à peine un degré en vingt-quatre heures. Si le sel est convenablement préparé, l'aiguille se fixe au bout de trois jours. Ce point est marqué zéro et indique la sécheresse extrême; l'intervalle entre les deux termes fixes vaut cent parties; chaque partie prend le nom de degré. (*Ess. sur l'Hygrom.*, 13-15-23.)

Il y a cette différence entre l'hygromètre et le thermomètre, que les deux points fixes du premier répondent à deux états absolus, tandis que les deux points fixes du second consistent en deux limites prises au milieu d'une série de points qui s'étend indéfiniment au-dessus et au-dessous de ses limites.

229. Plaçons maintenant l'hygromètre dans une masse d'air. L'action du cheveu sur la vapeur d'eau est tout-à-fait semblable à celle des substances desséchantes. Il absorbe les vapeurs jusqu'à ce que son affinité affaiblie ne puisse plus les précipiter. Supposons d'abord l'espace complètement saturé de vapeur; on observe que l'hygromètre marque l'humidité extrême, quelle que soit d'ailleurs la température. Puisque le cheveu, dans les diverses circonstances, s'allonge de la même quantité, il absorbe la même quantité d'eau : la quantité pondérable de vapeur contenue dans l'air est cependant d'autant plus grande que la température est plus élevée, mais la plus légère force suffit pour précipiter la vapeur d'un espace saturé; l'action du cheveu est une force de ce genre; et comme la quantité qu'exige le cheveu pour sa saturation est très petite relativement à celle qui se trouve dans l'air, il doit en prendre la même quantité, quelle que soit la température : voilà pourquoi il marque constamment le même point dans un air saturé. Nous faisons ici abstraction des changemens que la chaleur produit dans les dimensions du cheveu.

Supposons que l'espace ne soit pas complètement saturé, la vapeur ne cédera plus à une force très faible pour se précipiter, puisqu'elle peut résister à un certain degré de pression et à un certain degré de refroidissement. Il en résulte que l'effet du cheveu s'arrêtera au moment où l'action qu'il exerce sur les vapeurs sera égale à la force de pression nécessaire pour les précipiter.

230. D'après tout ce qui vient d'être dit sur l'hygromètre, on voit que cet instrument n'indique que le plus ou le moins d'humidité de l'air, et nullement la quantité absolue de vapeur. Il est très important de connaître les rapports entre les divers degrés de l'hygromètre et les quantités d'eau correspondantes. Ce travail avait été entrepris par de Saussure (*Essais*, 96); mais il ne peut plus être considéré comme exact aujourd'hui, nous nous bornerons à dire que Saussure avait remarqué que l'effet de l'humidité sur le cheveu est d'autant moins grand que l'air approche plus de la saturation.

M. Gay-Lussac a entrepris le même travail, et a suivi une méthode qui est à la fois simple et rigoureuse. Cette méthode consiste à déterminer la correspondance du degré de l'hygromètre à la tension de la vapeur. Ce rapport étant déterminé, il suffit de se rappeler que 10/16 est la densité de la vapeur d'eau pour pouvoir calculer le poids absolu de l'eau contenue dans l'air (*voyez* le commencement de l'*Hygrométrie*). Pour obtenir le rapport dont il est question, M. Gay-Lussac place successivement l'hygromètre dans une grande cloche à pied, contenant une certaine quantité d'eau pure ou d'acide sulfurique convenablement concentré, de manière à donner les différens degrés d'humidité de l'air depuis la saturation complète jusqu'à la sécheresse extrême. Il détermine à chaque expérience la tension du liquide dans le vide à la même température. L'hygromètre est fixé à un disque de verre luté hermétiquement. Bientôt cet instrument se met en équilibre avec les vapeurs contenues dans l'air et s'arrête à un certain degré de sa division. M. Gay-Lussac a formé de cette manière les deux tables suivantes.

Ces tables ont été formées à la température de 10°. A cette température la tension de la vapeur fournie par l'eau pure est de $9^{mm},48$. L'hygromètre placé dans de l'air où il y a de l'eau pure marque 100°. Si l'on substitue à l'eau pure un mélange d'acide et d'eau, la tension de la vapeur est moindre. Supposons qu'elle soit f, l'hygromètre marque un certain degré au-dessous de 100. Supposons 90°, si l'on représente par 100 la tension totale $9^{mm},48$, on aura le nombre correspondant à f par la proportion $100 : x :: 9^{mm},48 : f$.

On obtiendrait de la même manière toutes les tensions rapportées à 100 pour la tension de la saturation.

Tension de la vapeur.	Degrés de l'hygromètre à cheveu.	Tension de la vapeur.	Degrés de l'hygromètre à cheveu.	Tension de la vapeur.	Degrés de l'hygromètre à cheveu.
0	0,00	34	57,42	68	84,06
1	2,19	35	58,58	69	84,64
2	4,37	36	59,64	70	85,22
3	6,56	37	60,64	71	85,77
4	8,75	38	61,66	72	86,31
5	10,94	39	62,69	73	86,86
6	12,93	40	63,72	74	87,41
7	14,92	41	64 63	75	87,95
8	16,92	42	65,53	76	88,47
9	18,91	43	66,43	77	88,99
10	20,91	44	67,34	78	89,51
11	22,81	45	68,24	79	90,03
12	24,71	46	69,03	80	90,55
13	26,61	47	69,83	81	91,05
14	28,51	48	70,62	82	91,55
15	30,41	49	71,42	83	92,05
16	32,08	50	72,21	84	92,54
17	33,76	51	72,94	85	93,04
18	35,43	52	73,68	86	93,52
19	37,11	53	74,41	87	94,00
20	38,78	54	75,14	88	94,48
21	40 27	55	75,87	89	94,95
22	41,76	56	76.54	90	95,43
23	43,26	57	77,21	91	95,90
24	44,75	58	77,88	92	96,36
25	46,24	59	78,55	93	96,82
26	47,55	60	79,22	94	97,29
27	48,86	61	79 84	95	97,75
28	50,18	62	80,46	96	98,20
29	51,49	63	81,08	97	98,69
30	52,81	64	81,70	98	99,20
31	53,96	65	82,32	99	99,55
32	55,11	66	82 90	100	100,00
33	56,27	67	83,48		

Degrés de l'hygromètre à cheveu.	Tension de la vapeur.	Degrés de l'hygromètre à cheveu.	Tension de la vapeur.	Degrés de l'hygromètre à cheveu.	Tension de la vapeur.
0	0,00	34	17,10	68	44,89
1	0 45	35	17,68	69	46,04
2	0.90	36	18,30	70	47,19
3	1,35	37	18.92	71	48,51
4	1,80	38	19,54	72	49,82
5	2.25	39	20,16	73	51,14
6	2,71	40	20,78	74	52,45
7	3,18	41	21,45	75	53,76
8	3,64	42	22,12	76	55,25
9	4,10	43	22,79	77	56,74
10	4.57	44	23,46	78	58.24
11	5 05	45	24,13	79	59,73
12	5,52	46	24,86	80	61,22
13	6.00	47	25,59	81	62,89
14	6,48	48	26,32	82	64,57
15	6,96	49	27,06	83	66,24
16	7,46	50	27,79	84	67,92
17	7.95	51	28,58	85	69,59
18	8,45	52	29,38	86	71,49
19	8,95	53	30,17	87	73,39
20	9.45	54	30,97	88	75,29
21	9.97	55	31.76	89	77,19
22	10,49	56	32,66	90	79,09
23	11.01	57	33,57	91	81,09
24	11.53	58	34,47	92	83.08
25	12 05	59	35.37	93	85.08
26	12.59	60	36,28	94	87,07
27	13,14	61	37,31	95	89,06
28	13,69	62	38,34	96	91,25
29	14.23	63	39,36	97	93,44
30	14,78	64	40,39	98	95,63
31	15,36	65	41,42	99	97,81
32	15,94	66	42.58	100	100,00
33	16.52	67	43,73		

La première table donne le degré de l'hygromètre correspondant à la tension de la vapeur; c'est le contraire pour la seconde.

Ces tables, résultant d'expériences faites à 10 degrés, ne sont réellement applicables qu'à cette température. Cependant on ne commettrait pas une grande erreur, si l'on en étendait l'usage à toute autre température.

Elles montrent qu'il n'existe aucune proportionnalité entre l'allongement du cheveu et le degré d'humidité de l'air. Elles fournissent les résultats suivans :

Degré de l'hygromètre.	Eau de l'air.	Degré de l'hygromètre.	Eau de l'air.
0	0		
22	1/10	79	6/10
39	2/10	85	7/10
53	3/10	90	8/10
64	4/10	95	9/10
72	5/10	100	10/10

231. Ayant eu besoin de connaître le poids de la vapeur contenue dans l'air à une même température et à différens degrés del'hygromètre, je rapporterai ici le calcul et les résultats. Ces résultats expriment les quantités de vapeur aqueuse contenues dans un mètre cube d'air à la température de 10°, correspondantes aux différens degrés de l'hygromètre à cheveu, comptés de 10 en 10 depuis 0° jusqu'à 100°; on sait d'ailleurs que la force élastique de la vapeur d'eau à 10° est de 0m,00948.

Le poids d'un litre d'air à 0° et à 0m,76 étant 1g, 299, le poids du même volume d'air à 10° et à la pression 0m,00948 sera $\frac{1,299 \times 0,00948}{1,0375 \times 0,76}$; et puisque la densité de la vapeur est les 10/16 de celle de l'air, le poids d'un litre de vapeur d'eau à 10° sera $\frac{1,299 \times 9,48}{1,0375 \times 76 \times 16}$. Or un mètre cube contient mille litres, puisque le litre équivaut à un décimètre cube. Le poids d'un mètre cube de vapeur à la température de 10° est donc égal à 1000 fois ce dernier poids, c'est-à-dire à $\frac{1299 \times 9,48}{1,0375 \times 76 \times 16}$, ou 9g, 761.

En multipliant ce nombre constant par le rapport de la tension de la vapeur à un certain degré de l'hygromètre, à la tension totale représentée par 100 dans le tableau, et dont la valeur absolue est 0m, 00948, on aura les quantités de vapeur qui se trouvent dans un mètre cube d'air aux différens degrés de l'hygromètre, et qui sont indiquées dans le tableau suivant :

Degrés de l'hygromètre.	Vapeur contenue dans un mètre cube d'air.
0 degrés	0 grammes.
10.	0,446
20.	0,922
30.	1,443
40.	2,028
50.	2,713
60.	3,541
70.	4,606
80.	5,976
90.	7,720
100.	9,761

232. M. Dulong a suivi un procédé différent. Ce procédé consiste à faire arriver dans une grande cloche où se trouve suspendu l'hygromètre, un courant d'air saturé et un courant d'hydrogène sec, chacun avec une vitesse particulière et constante. Bientôt l'hygromètre se fixe à un certain degré. On n'arrête le courant que lorsque le degré est fixé depuis un temps notable. On reçoit le mélange à la sortie, et on l'analyse par les moyens connus en chimie. Si, par exemple, il arrivait 9 p. d'hydrogène sec et 1 p. d'air humide, le mélange de la cloche renfermait 1/10 de l'humidité qu'il renfermerait dans l'état de saturation. En répétant l'expérience avec des rapports différens de volumes d'air et d'hydrogène, on arriverait à construire une table semblable à celle du n° 230.

233. M. Mac. Melloni (*Ann. de Chim. et de Phys.*, t. 43, p. 39), en plaçant l'hygromètre à cheveu dans le vide, a formé une table analogue à celle de M. Gay-Lussac. L'appareil consiste en un large tube barométrique, sur lequel M. Melloni fixe la boîte renfermant l'hygromètre. En ne mettant dans cet appareil que la quantité d'eau nécessaire à la saturation de la boîte, en élevant ensuite plus ou moins le tube, on agrandit l'espace et l'on en diminue conséquemment le degré de saturation. Ce procédé doit être plus difficile que les deux précédens.

234. Dans tout ce qui précède nous n'avons pas eu égard à l'effet pyrométrique. Par exemple, si l'air dans lequel est placé l'hygromètre subit une élévation de température, sans recevoir de nouvelles vapeurs, le cheveu se raccourcit par l'évaporation d'une partie de l'eau qu'il renferme; d'un autre côté il s'échauffe et s'allonge, de sorte qu'on n'observe que la différence des deux effets. On ne possède pas aujourd'hui des données bien précises sur ce sujet.

235. Disons un mot des autres hygromètres. Celui des académiciens del Cimento était un vase de forme conique, plein de glace ou de neige, et suspendu la pointe en bas; les vapeurs de l'air se condensaient sur la surface extérieure; elles tombaient sous forme de gouttes, et par la fréquence de ces gouttes, on jugeait du degré de l'humidité de l'air. Cet instrument était tout-à-fait inexact.

236. Leroi a employé un moyen plus simple, lequel a fixé l'attention des physiciens dans ces derniers temps; un verre est en partie rempli d'eau à la température environnante, et par une addition successive d'eau à séro, on voit la vapeur se précipiter sur les parois extérieures du verre, et on note avec soin la température à laquelle la précipitation commence.

Supposons qu'on connaisse avec exactitude la température de la précipitation de la vapeur, et que ce soit 12°, par exemple; on cherchera dans la table des forces élastiques, on trouvera 10^{mm}, 7 à cette température; supposons que la température de l'air avant l'expérience soit de 18°, on prendra dans la même table la force élastique correspondante 15^{mm}, 4; le rapport entre la quantité d'humidité qui se trouve dans l'air, et celle qui s'y trouverait si l'air était complètement saturé, sera évidemment celui de 10^{mm}, 7 à 15^{mm}, 4. Si l'on voulait la tension de la vapeur à 18° il faudrait multiplier 10^{mm}, 7 par $\frac{1 + a \times 18}{1 + a \times 12}$ a étant égal à 0,00375 qui est le coefficient de la dilatation des gaz.

M. Daniel a construit un petit appareil qui est très commode pour ces expériences, et qui est formé de deux boules a et b, de verre mince, d'environ 3 centimètres de diamètre (*fig.* 147). La branche $a\,c$ renferme un thermomètre dont le réservoir plonge dans la boule a, qui est remplie en partie d'éther sulfurique, et ne contient pas d'air atmosphérique. La boule b est enveloppée de mousseline; si l'on verse de l'éther sur cette boule, elle se refroidit, et bientôt l'éther de l'autre boule entre en ébullition. On observe la marche du thermomètre, et l'on note la température à laquelle la vapeur de l'air commence à se déposer sur la partie $f\,g$. C'est la température à laquelle il faudrait amener l'air extérieur pour qu'il fût saturé. Il serait peut-être bon d'attendre que tout l'éther fût vaporisé et que le thermomètre remontât, et de noter la température à laquelle la vapeur déposée sur la boule disparaît. La moyenne entre la température de la volatilisation et celle de la précipitation serait la température qu'il faudrait prendre pour celle de la saturation de l'air. Un thermomètre m, fixé au support de l'appareil, donne la température de l'air.

237. Leslie a proposé un hygromètre qui n'est autre chose que son thermomètre différentiel légèrement modifié. L'une des boules est couverte d'un linge clair mouillé; l'évaporation produit du froid, et la liqueur monte d'un certain nombre de degrés. Le temps nécessaire pour déterminer cet effet n'excède jamais deux minutes. On gradue cet hygromètre en déterminant le froid produit dans un air complètement dépouillé de vapeur d'eau. Comme le froid produit est proportionnel à l'évaporation, il en résulte que si le froid, dans une observation, est la moitié du froid maximum, il manque à l'air la moitié de la vapeur qui lui est nécessaire pour sa saturation complète, et ainsi de suite. Cet instrument n'est pas aussi commode qu'on le croirait d'abord. On sait que le froid varie avec la température et avec la pression, de sorte qu'il est nécessaire d'avoir des tables du froid produit à diverses températures et à diverses pressions; par exemple, si l'on devait faire servir cet hygromètre sur une montagne, il faudrait y déterminer préalablement le froid maximum dans un air sec à la température et à la pression de cette montagne. Quoi qu'il en soit, cet hygromètre est simple, d'une construction facile, et a l'avantage de faire connaître immédiatement la quantité de vapeur qui se trouve dans l'air, et d'être moins altérable que les hygro-

mètres construits avec des substances organiques. (*On Heat and Moisture.*)

238. On avait proposé anciennement un hygromètre consistant en une boule d'ivoire remplie de mercure, adaptée à un tube de verre très capillaire. M. Daniel Wilson a remplacé la boule d'ivoire de cet instument par une vessie de rat, convenablement préparée. La graduation se fait comme celle de l'hygromètre de Deluc; cet instrument jouit, selon M. Wilson, d'une grande sensibilité (*Ann. de Ch. et de Phys.*, 5°). Il est représenté dans la *fig.* 127 *bis*. Les résultats obtenus avec cet instrument devraient être corrigés de la température.

239. L'hygromètre de Deluc est peu différent de celui de Saussure; il lui est un peu postérieur; le cheveu y est remplacé par une bandelette de baleine très mince, et cette bandelette est tendue au moyen d'un ressort. Pour avoir la sécheresse extrême, on place l'instrument sous une cloche remplie d'air sec; quant à l'humidité extrême, on l'obtient en plongeant la bandelette tout entière dans l'eau. Comme il y a une différence de plus de dix degrés entre l'imbibition et l'humidité extrême, et comme d'ailleurs cet instrument ne doit servir que dans l'air humide, on conçoit qu'il est préférable de le graduer comme celui de Saussure.

240. M Babinet a apporté à l'hygromètre de Saussure une modification qui rend cet instrument plus simple dans sa construction et plus exact dans ses indications. Le poids de l'hygromètre modifié est librement suspendu au cheveu, dont on mesure l'allongement directement, en visant, avec un microscope fixe, un repère gravé sur ce poids. Le cheveu est attaché par sa partie supérieure à une vis micrométrique au moyen de laquelle on la relève ou on l'abaisse jusqu'à ce que le trait de repère coïncide avec le fil du microscope; l'allongement est donné par le mouvement de la vis micrométrique.

M. Delarive (*Ann. de Ch. et de Phys.*, t. 30, p. 87) pense qu'on peut estimer le degré hygrométrique de l'air par un thermomètre couvert d'une très légère couche d'acide sulfurique concentré; pour que cette couche soit sensiblement constante en épaisseur, on plonge la boule du thermomètre dans l'acide pendant une minute, et on lui donne une légère secousse; on le porte dans l'air, l'acide se saisit de la vapeur de l'air et dégage de la chaleur. On conçoit que l'effet thermométrique sera d'autant plus grand, pour un même degré d'humidité de l'air, que la température sera plus élevée, puisque la quantité absolue de vapeur sera plus grande; en sorte qu'il faudra, à la rigueur, une graduation pour chaque température.

241. M. Dulong s'est occupé de comparer l'hygromètre de Saussure à celui de Deluc; il règne un accord parfait entre les observations de M. Gay-Lussac et celles de M. Dulong relatives à l'hygromètre à cheveu, comme on va le voir par le tableau suivant. Dans le tableau la densité de la vapeur à 13°,9 pour la saturation complète est représentée par 100.

Densité de la vapeur à 13° 9.	Hygromètre de Deluc.	Hygromètre de Saussure.
0,0997	12°,2	28
0,1980	18 ,0	44
0,2976	22 ,5	55
0,4876	31 ,8	75
0,5912	37 ,5	84
0,6844	45 ,5	91
0,7797	54 ,0	93
0,8774	58 ,0	97,5
0,9762	70 ,0	103

Il résulte du tableau précédent que l'hygromètre de Deluc est plus sensible que celui de Saussure vers l'humidité extrême, ce qui est un avantage; car dans la nature l'air n'est jamais très rapproché de la sécheresse extrême à une température et à une pression communes; par exemple, à la surface de la terre l'hygromètre à cheveu ne se tient jamais au-dessous de 30 degrés. Saussure ne l'a jamais vu au-dessous de 40°, et il a remarqué qu'il se tient en général à 60°. M. Gay-Lussac, dans son ascension aérostatique, a vu l'hygromètre descendre à 26°, le thermomètre étant à — 10°. (*Voyez* dans les Additions, des expériences faites par M. de Humboldt en Russie.)

Des Densités.

242. On dit que des corps sont plus ou moins denses, selon qu'ils renferment, à volume égal, plus ou moins de particules matérielles, également pesantes. Il en résulte que la *densité* relative de deux corps n'est autre chose que le rapport de leur poids sous un même volume.

243. Le poids d'un corps varie d'un lieu à un autre (n° 26). La balance ne peut pas faire connaître cette variation, parce que les poids de tous les corps croissent ou décroissent dans le même rapport. Si P représente le poids d'un corps, V son volume, D sa densité, g la gravité du lieu où l'on considère le poids, on a $P = V D g$.

Nous remarquerons que les lettres P, V, D, g, représentent des nombres abstraits. Ainsi, V est le nombre d'unités cubiques que renferme le volume du corps, D le rapport numérique de sa densité à celle de l'eau prise pour unité. La pesanteur g est également rapportée à la pesanteur d'un lieu déterminé, prise pour unité. P désigne le nombre d'unités de poids rapportées à ce dernier lieu. (*Voy.* les ouvrages de statique.)

C'est à l'eau, portée à 4°, température de son maximum de densité, qu'on doit rapporter les densités des solides et des liquides. L'air, à 0° de température et à 0m, 76 de pression, sert de terme de comparaison pour les fluides élastiques permanens

ou non permanens. On a préféré l'air à tout autre gaz, parce qu'il est de même nature dans tous les climats et dans toutes les saisons.

Densité des Gaz.

244. Le procédé employé pour la détermination de la densité des gaz est extrêmement simple. Il consiste à peser un ballon de huit à dix litres, vide et successivement plein d'air et de différens gaz.

Ce ballon doit être fermé par un robinet très bien travaillé afin qu'il puisse conserver le vide. Il est indispensable d'opérer sur un volume un peu considérable, à cause de la légèreté des gaz. Si la capacité du ballon n'était que d'un à deux litres, les erreurs des pesées auraient trop d'influence sur les résultats.

Quand on opère sur l'air atmosphérique, il n'y a d'autre précaution à prendre que de le dessécher, et de le dépouiller de l'acide carbonique qu'il renferme.

Si l'on opère sur un autre gaz, il est nécessaire en outre qu'il soit renfermé dans une cloche. Est-il peu soluble, comme l'oxigène, l'hydrogène, l'azote, on peut le conserver quelque temps sur l'eau, quoiqu'il soit plus exact d'opérer sur le mercure. Est-il soluble, comme l'acide sulfureux, l'acide hydrochlorique, le gaz ammoniacal, on doit le recueillir sur le mercure.

La *fig.* 140 indique la disposition de l'appareil. *M* est le ballon; *B* la cloche qui reçoit le gaz; *CD* le tube rempli de chlorure de calcium ou de potasse (1). Le gaz passe de l'appareil où il se produit dans la cloche par le tube *C D*; puis, les robinets *R* et *R'* étant ouverts, il pénètre de la cloche dans le ballon. On fait arriver de nouveau gaz jusqu'à ce que le niveau reste le même tant dans l'intérieur de la cloche qu'à l'extérieur, afin que ce gaz ne soit soumis qu'à la pression atmosphérique.

Soit p le poids du ballon vide, P le poids du ballon rempli d'air. $P - p$ sera le poids de l'air contenu. La même expérience, faite avec un autre gaz, donnera $P' - p$ pour le poids de ce gaz, et comme les densités sont proportionnelles aux poids sous le même volume, on aura, en prenant la densité de l'air, la proportion.

$$1 : d :: P - p : p' - p \text{ d'où } d = \frac{P' - p}{P - p}.$$

Comme il est rare que l'expérience sur l'air et celle sur le gaz qu'on lui compare, soient faites à la même température, nous indiquerons les moyens de ramener les résultats des expériences à une même température et à une même pression. On choisit ordinairement pour plus de simplicité la température zéro, et la pression moyenne $0^m,76$.

(1) Pour les gaz acides, le chlorure de calcium, pour les gaz alcalins ou neutres, la potasse.

L'élévation de température tend à diminuer la densité du gaz et à augmenter la capacité du ballon; la pression exerce aussi une influence, puisque nous avons vu que les poids d'un même volume de gaz sont, dans certaines limites, proportionnels aux pressions (loi de Mariotte, n° 206).

Supposons que pour un gaz quelconque nous ayons trouvé un poids P à la température de $15^o,5$, et à la pression $0^m,75$. Pour rendre le calcul plus simple, représentons $15^o,5$ par t, $0^m,75$ par H, et par e l'élasticité qui reste dans le ballon malgré l'action de la machine pneumatique. D'après la loi de Mariotte, nous aurons

$$P : X :: H - e : 0,76, \text{ d'où } X = \frac{P \times 0,76}{H - e};$$

X est le poids corrigé de la pression : pour le corriger de la température, rappelons-nous qu'un volume de gaz à zéro étant 1, devient $1 + a\,t$ à la température t (a est égal à 0,00375). En conséquence le poids du gaz à la température t doit être au poids à zéro comme $1 : 1 + a\,t$. D'où il suit qu'il faut multiplier le poids trouvé par $1 + at$. Ainsi $X(1 + at)$ est le poids à zéro, et à $0^m,76$ de pression.

Il ne reste plus qu'à faire la correction relative au vase. L'élévation de la température du vase le dilate, en agrandit la capacité dans le rapport de 1 à $1 + k\,t$ (k étant le coefficient de la dilatation cubique du verre pour un degré). Le poids corrigé de la température et de la pression sera donc $\frac{P \times 0,76 \times (1 + at)}{(H - e)\,(1 + k\,t)}$. Comme souvent la différence de température est faible, et comme d'ailleurs le verre est peu dilatable, on néglige la correction du ballon.

245. MM. Arago et Biot ont déterminé avec une très grande précision le poids d'un litre d'air sous la latitude 45°, à la pression $0^m,76$ et à la température de la glace fondante. La capacité du ballon, dans leurs expériences, était de 5,5814 litres. Le poids de l'air contenu à zéro et $0^m,76$ était de $7^g,2532$. D'où l'on trouve $1^g,2995$ pour le poids d'un litre d'air. Si l'on veut rapporter la densité de l'air à celle de l'eau à 4°, il faudra diviser le poids d'un centimètre cubique d'air où $0^g,0012798$ à 4°, par un gramme qui est le poids du même volume d'eau à la même température ce qui donnera 1/782 pour le rapport des densités.

246. Si le gaz exerçait une action sur le robinet, on le recueillerait dans un vase à l'émeri; pour cela on ferait arriver le gaz dans le flacon plein d'air, assez long-temps pour que ce fluide fût chassé. On reconnaîtrait l'époque où cette condition serait remplie, en recevant le gaz expulsé de ce flacon par le courant. Soit P le poids du flacon plein de gaz, P' celui du flacon plein d'air, $P - P'$ serait le poids du gaz diminué du poids d'un pareil volume d'air; d et d' étant la densité du gaz et celle de l'air, V la

capacité du flacon, $V d$ serait le poids du gaz et $V d'$ celui de l'air. On aurait donc l'équation $P - P' = V d - V d'$ dans laquelle tout est connu, à l'exception de d.

Des Aérostats.

247. La belle découverte des aérostats a été faite par Montgolfier; il lança le premier ballon à Annonay en 1792. Ce ballon en papier avait 36 pieds de diamètre; il était rempli de gaz dilaté, chargé de gaz et de vapeurs provenant de la combustion de la paille ou de toute autre matière semblable, la combustion s'opérait dans un fourneau placé au-dessous du ballon. Pilastre Desrosiers et Darlandes osèrent bientôt s'élancer dans les airs avec un ballon ainsi disposé.

M. Charles, réfléchissant à tous les dangers attachés aux montgolfières, eut l'heureuse idée de substituer à l'air dilaté l'hydrogène, dont la densité est 14 ou 15 fois moindre que celle de l'air ordinaire; il remplaça le papier par du taffetas enduit de vernis de caoutchouc.

Charles et Robert s'élevèrent dans un ballon de 26 pieds de diamètre, et parcoururent un espace de neuf lieues avant de descendre. A peine M. Charles eut-il porté les aérostats à ce degré de perfection, que l'on espéra les faire servir à la prospérité publique; on les employa à la guerre, dans les recherches scientifiques. MM. Biot et Gay-Lussac, d'après le vœu de l'institut, entreprirent un voyage aérostatique, dont le but principal était de rechercher la loi du décroissement des forces magnétiques du globe à de grandes distances; ils s'élevèrent ainsi à 4000 mètres. M. Gay-Lussac s'éleva seul à une hauteur de 6636 mètres.

Pour concevoir la théorie des aérostats, qu'on imagine d'abord un volume de gaz hydrogène renfermé dans une enveloppe sans pesanteur; ce volume, sollicité par la pesanteur, tend à descendre, mais d'une autre part il est poussé en haut par une force égale au poids du volume d'air qu'il déplace diminué de son propre poids (n° 46). Il doit donc monter jusqu'à ce que le poids du volume d'air déplacé soit égal au sien. A mesure que le ballon s'élève, le gaz intérieur se dilate pour se mettre à la même pression que l'air extérieur. Le changement de température produit aussi le même effet sur le gaz intérieur que sur le gaz extérieur; en sorte que la force ascensionnelle est sensiblement constante.

On calcule facilement le poids que peut enlever un ballon d'un volume déterminé; par exemple, un ballon de 10 mètres de diamètre a un volume de 523,6 mètres cubiques; ce volume d'air à la pression $0^m,76$ et à zéro de température pèse 680^k, 416; le même volume d'hydrogène ne pèse que $46^k,816$. La différence est de $6333^k,60$, poids que le ballon peut enlever et soutenir. On ne charge jamais le ballon autant que l'indique ce calcul, afin qu'il puisse monter.

Il y a dans la partie supérieure du ballon une soupape qui permet de faire sortir du gaz quand on veut descendre. Cette expulsion ne doit être faite qu'avec précaution, parce que si le ballon descendait d'une manière continue, il prendrait nécessairement un mouvement accéléré. On jette même un peu de lest, afin que la descente se fasse en quelque sorte par cascade. Si l'on veut monter, on jette du lest; ce lest est du sable contenu dans de petits sacs. Les aérostats à gaz hydrogène sont les seuls en usage aujourd'hui. Pilastre Desrosiers voulut combiner les aérostats à gaz hydrogène avec les montgolfières. C'était une combinaison bien dangereuse; aussi périt-il victime de son ignorance.

On a fait beaucoup de tentatives pour diriger les ballons, mais jusqu'à présent on n'est parvenu à aucun résultat satisfaisant.

Densité des liquides

248. 1er Procédé. Comme nous l'avons déjà dit, les densités des liquides sont rapportées à celles de l'eau. On obtient la densité d'un liquide en pesant un flacon bouché à l'émeri, successivement plein d'air, d'eau et du liquide dont on désire connaître la densité.

Exemple: Poids du flacon plein d'eau	$195^g,678$
— plein d'air.	$128^g,595$
Poids de l'eau.	$66_g,083$
Poids du même flacon, plein d'alcool.	$181^g,515$
— plein d'air	$128^g,595$
Poids de l'alcool	$52_g,920$

A cause de la grande différence qui existe entre la densité de l'air et celle du liquide le plus léger, on se dispense de retirer le premier du flacon. En retranchant le poids du flacon vide de celui du flacon plein, on a le poids du liquide; et comme les densités sont proportionnelles aux poids sous le même volume, la densité de l'alcool est à celle de l'eau, prise pour unité, comme 52,920 : 66,083; ce qui donne 0,790 pour la densité de l'alcool.

On a toujours soin de plonger pendant un certain temps le flacon, avant de le peser, dans une même masse d'eau; entretenue à une température constante.

La variation de la pression étant sans influence sensible sur la densité des liquides et des solides, on n'en tient pas compte.

L'expérience précédente a été faite à 15°,5. Pour avoir les résultats à 4°, il suffit de faire porter la correction sur les poids des liquides, en faisant attention que les poids sont d'autant plus petits que les liquides sont plus dilatés; de sorte que, si la température est représentée par t, que le

coefficient de la dilatation de l'alcool soit a, et celui de l'eau e, les poids précédens deviendront à $4^{g},62_{5},920 \frac{1+at}{1+a4^{\circ}}$ et $66_{g},983\,(1+e\,(t-4)$. On compare ordinairement les densités à l'température des corps environnans.

249. IIe Procédé. Le deuxième procédé est fondé sur le principe d'Archimède. Ce grand géomètre l'a découvert en cherchant, à l'invitation de Hiéron, roi de Syracuse, si une couronne d'or faite pour ce prince renfermait de l'alliage. La condition de ne pas endommager la couronne était imposée au géomètre.

Pour mettre ce procédé en pratique, on suspend par un fil très fin un cube métallique au plateau d'une balance. On établit l'équilibre entre les deux plateaux, le cube étant suspendu dans l'air; on plonge ensuite successivement le cube toujours attaché au plateau, dans différens liquides; les poids qu'il faudra mettre, à chaque opération, dans le plateau auquel est fixé le cube, exprimeront les pertes qu'il éprouve dans les différens liquides, ou les poids des volumes de ces liquides qu'il déplace; mais ces volumes sont égaux, puisque c'est toujours le même cube qu'on emploie; d'ailleurs on a soin de maintenir la température invariable, en plaçant toujours le vase dans une même masse d'eau dont la température est rendue constante (1).

Le premier procédé est le plus souvent employé. Cependant ils sont susceptibles d'une égale précision; le premier, seulement, est plus commode dans beaucoup de circonstances, et particulièrement pour les liquides qui se détériorent par le contact de l'air atmosphérique.

250. Il existe dans les anciens cabinets de physique un instrument (*fig.* 129 *bis*) qui donne immédiatement les densités. Cet appareil se compose d'un siphon dont les branches $A\,B$ et $C\,D$ sont égales, et qui communiquent par leur partie supérieure à un corps de pompe, semblable à celui d'une machine pneumatique. Un robinet R sert à établir ou à intercepter la communication entre le siphon et le corps de pompe. Si l'on met le piston en mouvement, l'air du siphon sortira en partie, et chaque liquide s'élèvera à une certaine hauteur. Si l'on représente par D la densité de l'un des liquides, et H la hauteur à laquelle ce liquide s'élève, par H' et D' les quantités correspondantes pour l'autre liquide, on aura $H : H' :: D' : D$, d'où $\frac{D'}{D} = \frac{H}{H'}$

Ce procédé, peu susceptible de précision, n'est plus employé aujourd'hui.

M. Babinet obtient les densités par un procédé assez expéditif. L'appareil fig. 129 *ter* consiste en un siphon dont la partie intermédiaire ABC est remplie d'air. On verse les liquides de manière que les points $m\,C\,B\,n$ soient sur une même horizontale. Les densités sont en raison inverse des hauteurs au-dessus de la ligne $m\,n$; la partie courbée peut être séparée en o.

Densités des Corps solides.

251. Le deuxième procédé, employé pour connaître les densités des liquides, peut être appliqué aux solides; il suffira de peser les différens corps dans l'air et dans l'eau; le poids dans l'air, divisé par la perte dans l'eau, donnera la densité rapportée à ce dernier liquide.

Ce procédé réunit à l'avantage d'une grande précision celui de pouvoir être employé en grand; par exemple, s'agit-il d'avoir la densité d'une masse de fonte, de bronze, d'une feuille de tôle : on pèsera le corps dans l'air; on le fixera ensuite au plateau d'une forte balance; on en prendra le poids dans l'eau; le procédé suivant est presque exclusivement adopté pour les laboratoires.

On pèse d'abord un flacon bouché à l'émeri, plein d'eau distillée et de la capacité d'un à deux décilitres. Soit P ce poids, soit également p le poids du corps dans l'air; si l'on introduit ce corps dans le flacon plein d'eau, il en chassera un volume de liquide égal au sien; et si l'on fait une troisième pesée, et que P' représente le poids du flacon contenant le corps solide, $P+p-P'$ sera évidemment le poids du volume d'eau déplacé, de sorte que $\frac{p}{P+p-P'}$ sera la densité du corps solide.

Exemple. Poids du flacon plein d'eau. 183g,543
Poids d'un fragment d'argent dans l'air. 22g,474

TOTAL. 206g,017

Poids du flacon contenant l'eau et le corps. 203g,872
Poids de l'eau déplacée. 2g,145

On a donc $\frac{22,474}{2,145}$ ou 10,477 pour la densité de l'argent.

Ce procédé convient aux corps plus légers ou plus pesans que l'eau.

Il est surtout avantageux pour la détermination

(1) Rien n'est plus simple que de tenir compte de la perte occasionée par l'air dans la pesée du corps. En effet, soient V le volume et d la densité du corps; P le poids dans l'air; d' la densité du liquide; d'' celle de l'air rapportée à celle de l'eau, qui est prise pour unité; P' le poids du corps dans l'eau; P'' le poids dans le liquide : on aura $P = Vd - Vd''$; $P' = Vd - V$; $P'' = Vd - Vd'$; d'où $d' = \frac{P - P'' - d''(P' - P'')}{P - P'}$.

des densités des corps en poudre, comme le sable, le charbon, etc. Il faut avoir soin alors de placer le flacon renfermant l'eau et la poudre, sous la machine pneumatique, afin de faciliter, par le vide, le dégagement de l'air interposé. On fait même quelquefois bouillir le liquide.

252. Il y a des corps dont la porosité est assez grande pour qu'une certaine quantité d'eau soit absorbée. Dans ce cas, on peut demander la densité *réelle* ou la densité *apparente*. Pour avoir la première, on opère comme il vient d'être indiqué, en laissant le corps assez long-temps en contact avec le liquide pour que l'imbibition soit complète. Soit P le poids du corps dans l'air, soit P' le poids du volume d'eau déplacé; $\frac{P}{P'}$ sera la densité réelle.

Si l'on pèse le corps après l'imbibition, l'accroissement p de poids sera le poids de l'eau qui aurait été déplacée en plus, si l'imbibition n'avait pas eu lieu, si, par exemple, le corps avait été couvert d'une couche de vernis. La densité apparente ou extérieure du corps sera donc $\frac{P}{P' + p}$.

253. Si la substance avait de l'action sur l'eau, si c'était, par exemple, un sel soluble, on en prendrait la densité par rapport à un liquide sur lequel il n'aurait pas d'action, et dont on connaîtrait la densité rapportée à celle de l'eau. Par exemple, la densité d'un sel ou d'un corps soluble dans l'eau devrait être prise par rapport au mercure, et comme ce métal pèse 13,586 fois plus que l'eau, il faudrait multiplier le résultat par 13,586. Il est possible qu'un corps ait tout à la fois de l'action sur l'eau et sur le mercure, tel est le potassium; alors on en prendrait la densité par rapport au liquide sur lequel ce métal n'a pas d'action, par exemple, par rapport à l'huile de naphte, et l'on multiplierait le résultat par 0,8, densité de cette huile.

Des Aréomètres.

254. Les notions précédentes renferment tout ce qu'il importe de connaître pour déterminer les pesanteurs spécifiques. Nous ne devons pas cependant omettre de faire mention des aréomètres ou pèse-liqueurs, instrumens imaginés pour rendre l'opération plus prompte quand il s'agit des liquides. Le commerce des eaux-de-vie, des acides, etc., en exige l'emploi continuel.

255. Les aréomètres sont à volume constant ou à volume variable. La construction de ces instrumens est fondée sur ce que, si un corps plonge dans un liquide et surnage en partie, le poids du volume de liquide déplacé est égal à celui du corps entier (n° 46).

L'aréomètre de Farenheit est un aréomètre à volume constant, formé en ferblanc ou en cuivre très mince. Il est représenté par la figure 141. C est un plateau destiné à recevoir des poids; DC est une tige du diamètre d'une demi-ligne et de la longueur de quatre à six pouces; DE est un tube plus large; il peut avoir d'un à deux pouces de diamètre. L'instrument se termine par une boule M, qu'on remplit de plomb, afin qu'il soit dans un équilibre stable. Dans chaque expérience l'instrument doit plonger jusqu'au trait b. On le fait assez peu pesant pour que, plongé avec son propre poids dans le liquide le plus léger, il ne s'enfonce point jusqu'à ce point. On place dans le plateau supérieur des poids additionnels qui, réunis au poids de l'instrument, représentent celui du volume de liquide déplacé; et, comme ce volume est constant dans chaque expérience, on a tout ce qu'il faut pour connaître les densités. Supposons que l'instrument pèse P et qu'il faille ajouter p pour qu'il s'enfonce dans l'eau jusqu'en b; si on l'immerge dans un autre liquide, et qu'il faille le poids p' pour qu'il s'arrête au même point b, il est visible que les densités des deux liquides seront dans le rapport de $P + p$ à $P + p'$.

Application. Un aréomètre, dont le poids est égal à 35s,252, exige encore 15s,251 de poids additionnel pour qu'il s'enfonce dans l'eau pure jusqu'au point marqué sur la tige.

Le même aréomètre avec son poids 35s,222, porté dans un autre liquide, exige 25s,174 pour plonger jusqu'au même point.

La densité du second liquide, prise par rapport à l'eau, sera $\frac{60,426}{50,503} = 1,196$. On emploie peu cet aréomètre aujourd'hui. On ramènerait par les formules ci-avant tous les résultats à une même température, par exemple, à 4°.

256. Nicholson a étendu l'usage de l'aréomètre de Farenheit, en adaptant un plateau à la partie inférieure. Cet aréomètre devient alors une petite balance hydrostatique, avec laquelle on peut prendre la densité d'un corps solide. Il suffit de peser ce corps successivement dans l'air en le plaçant dans le plateau supérieur, et dans l'eau en le plaçant dans le bassin inférieur. S'il est plus léger que l'eau, on l'attache au plateau inférieur. Dans tous les cas, le poids du corps pris dans l'air, divisé par la perte dans l'eau, donnera la densité. La *fig.* 150 représente l'appareil. Ce procédé peut servir dans des voyages minéralogiques; mais il est trop peu exact pour être employé dans des recherches sévères.

257. L'aréomètre à volume variable et à poids constant donne immédiatement les densités sans le secours de poids.

La forme de l'instrument est à peu près la même que celle de l'aréomètre de Farenheit; seulement la tige est moins fine; elle a 2 à 3 lignes de diamètre : tout l'instrument est en verre (*fig.* 142). Supposons que, plongé dans l'eau pure, il s'arrête

en D, et que, plongé dans un liquide d'une densité double, il s'arrête en B; le volume de la tige $B\,D$ sera évidemment la moitié du volume total $D\,B\,C$: on divise cette tige sensiblement cylindrique en dix parties égales, chacune d'elles est le dixième du volume $B\,C$; mais comme le poids de tout l'aréomètre est constant, le volume déplacé par l'instrument dans chaque liquide aura le même poids; les densités des divers liquides seront donc en raison inverse des volumes plongés. Le volume dans l'eau étant 20, les densités correspondantes aux divisions 10, 11, 12, 13, 14, etc., seront 20/10, 20/11, 20/12, 20/13, 20/14, etc. L'aréomètre, ainsi gradué, donnera immédiatement la densité d'un liquide plus pesant que l'eau.

Si l'on veut connaître par le même moyen la densité d'un liquide plus léger, on s'arrange de manière que, dans l'eau distillée, la presque totalité de la tige soit hors de l'eau, comme le représente la *fig.* 143. A est le point de l'eau distillée, B celui où s'arrête l'aréomètre plongé dans un liquide d'une densité moitié plus petite que celle de l'eau.

La tige $A\,B$, dont le volume est égal à celui de la partie $A\,C$, est divisé en parties égales. On écrit à côté de chaque division la densité correspondante, en commençant par A; elles seront successivement 10/10, 10/11, 10/12, 10/20...

258. Dans cette graduation les degrés tracés sur l'échelle sont égaux et correspondent à des densités croissantes ou décroissantes d'une *quantité inégale*. Nous avons pris, pour plus de simplicité, les densités dans un rapport double; la graduation se ferait toujours de la même manière quand elles seraient dans un rapport quelconque. Ce procédé de graduation suppose le diamètre égal dans toute la longueur de la tige, condition qui est loin d'être remplie en général. Voici un procédé indépendant de l'égalité du diamètre.

Supposons que l'aréomètre s'arrête dans l'eau distillée en A (*fig.* 144) et qu'on veuille écrire les densités sur la tige, rien ne serait plus simple si l'on avait des liquides de différentes densités; on y plongerait successivement l'instrument, et l'on noterait, à chaque immersion, la densité du liquide sur la tige. Cette manière d'opérer exigerait un grand nombre de liquides, on peut s'en passer; il suffit d'avoir de l'eau pure, des poids et une balance pour graduer un aréomètre avec une grande exactitude. En effet, supposons qu'un instrument de ce genre plonge dans un liquide d'une densité plus grande que celle de l'eau, et qu'il s'arrête en B; on pourra l'alléger de manière à le faire arrêter au même point B dans l'eau distillée; il ne faut pour cela qu'enlever une portion du plomb ou du mercure servant de lest. Soit p le poids primitif de l'instrument quand il s'arrête en B dans le liquide dont la densité est d; soit x le poids dont il doit être diminué pour que dans l'eau l'aréomètre s'arrête au même point B. Dans les deux liquides le volume déplacé est le même, les densités de ces liquides sont donc entre elles comme les poids de l'instrument dans les deux cas; on aura donc :

$$p - x : p :: 1 : d, \text{ d'où } x = p - \frac{p}{d}.$$

Si l'on donne une valeur à d, on aura pour x les poids qu'il faudra retrancher de l'aréomètre, pour que cet instrument, étant plongé dans l'eau pure, s'arrête au même point auquel il s'arrêterait, si avec tout son poids il était plongé dans le liquide de la densité d. En donnant à d diverses valeurs, depuis 2 jusqu'à 1, on aura tous les points de la tige correspondans à ces densités, et l'instrument sera gradué. Il faudra après cela rendre à l'aréomètre son poids primitif, le fermer à la lampe. Il sera propre à donner toutes les densités depuis 1 jusqu'à 2.

L'aréomètre ainsi gradué servirait à donner les densités des liquides plus pesans que l'eau; on suivrait absolument la même marche pour la graduation d'un instrument destiné à donner les densités des liquides plus légers. Soit $C\,D$ (*fig.* 145) un aréomètre qui, dans l'eau pure, s'arrête en D; plongé dans un liquide d'une densité moindre, il s'arrêtera en C. Si l'on augmente le poids de l'instrument, il pourra s'enfoncer jusqu'en C dans l'eau distillée. Soit x le poids additionnel, soit p le poids primitif de l'instrument, on aura la proportion d :

$$1 :: p : p + x, \text{ d'où } d = \frac{p}{p+x}.$$

En donnant successivement à d les valeurs 0,9; 0,8; 0,7; 0,6,... 0,5, on aura les poids qu'il faudra ajouter au poids p de l'instrument; on plongera ensuite celui-ci dans l'eau pure; on notera sur la tige les densités 0,9; 0,8... 0,5. Le reste s'achèvera comme nous l'avons indiqué plus haut.

259. Les aréomètres les plus connus dans le commerce sont ceux de Beaumé; ils indiquent qu'un liquide est plus ou moins pesant qu'un autre liquide, mais n'en donnent pas la densité : les nombres tracés sur l'échelle n'ont aucun rapport entre eux. Pour les liquides plus pesans que l'eau, on plonge l'instrument successivement dans l'eau pure et dans un mélange de 85 parties d'eau et de 15 de sel. On divise l'intervalle en 15 parties égales, en marquant o le point correspondant à l'eau; on prolonge l'échelle au-dessous. Le 54e degré correspond à l'acide nitrique, le 66e à l'acide sulfurique. Pour les liquides plus légers on opère de même; seulement la dissolution saline renferme 10 parties de sel; le zéro est marqué au point où s'arrête l'instrument dans cette dissolution. On divise l'intervalle en 10 parties égales, et l'on prolonge la division au-dessus du 10e degré, qui correspond à l'eau. L'alcool du commerce marque 35°, l'alcool pur 44 à 45°, l'éther sulfurique 70°, etc.

Voici comment on gradue cet aréomètre de ma-

nière à lui faire marquer immédiatement les densités.

Supposons que l'instrument (*fig.* 154) plonge jusqu'en A dans l'eau pure, et qu'il s'enfonce jusqu'en B dans un autre liquide d'une densité moindre; supposons de plus que l'intervalle $A\,B$ comprenne m des divisions qu'on veut déterminer, et dont chacune doit correspondre par exemple à 1/100 de variation de densité, soit V le volume $C\,A$, et V' le volume $C\,B$; ces deux volumes, ayant le même poids (celui de l'instrument), sont en raison inverse des densités des liquides. Si donc 1 est la densité de l'eau, on aura :

$$V : V' :: 1 - \frac{m}{100} : 1, \text{ d'où } V' = \frac{100\,V}{100 - m};$$

$$\text{d'où } V' - V = AB = \frac{m\,V}{100 - m}.$$

Si l'on fait successivement $m = 1$; $= 2$; $= 3$, etc. on aura $\frac{1V}{99}$; $\frac{2V}{98}$; $\frac{3V}{97}$ pour les portions de la tige qui correspondent aux densités $1 - 1/100$; $1 - 2/100$, etc.; il ne reste donc qu'à tracer sur la tige, à dater de A, les divisions correspondantes aux volumes $\frac{V}{99}$; $\frac{2V}{98}$; $\frac{3V}{97}$.....

Pour cela on construira un triangle équilatéral (*fig.* 155) sur une ligne $m\,n$ préalablement divisée à partir de A en parties proportionnelles à 1/99; 2/98; 3/97; et prenant $p\,K = A\,B$.

$K\,F$, parallèle à $m\,n$, et égale à $p\,K$ et à $A\,B$, sera divisée en parties proportionnelles à celles de $m\,n$. De sorte qu'en plaçant la tige de l'aréomètre sur la ligne $K\,F$, de manière que le point A soit en K, elle sera divisée convenablement. On agira de même pour un autre aréomètre.

L'aréomètre ainsi construit donnera les densités des liquides plus légers que l'eau; il deviendra propre à donner les densités de liquides plus pesans, si l'on prolonge la division de la tige au-dessous de A, de manière que les parties soient, à dater de ce point, $\frac{V}{101}$; $\frac{2V}{102}$; $\frac{3V}{103}$; etc.

En effet, soit V'' le volume de l'aréomètre plongé dans un liquide d'une densité $1 + \frac{m}{100}$, on aura

$V : V'' :: 1 + \frac{m}{100} : 1$, d'où l'on tire $V - V'' = \frac{V\,m}{100 + m}$: en faisant successivement $m = 1$; $= 2$; $= 3$..... on aura la progression $\frac{V}{101}$; $\frac{2V}{102}$; $\frac{3V}{103}$....

Dans cette graduation, les parties de la tige correspondront à des différences de densités égales, et seront inégales.

Les densités étant déterminées par les procédés indiqués plus haut, avec plus d'exactitude que par les aréomètres, on n'emploie ces derniers que pour les usages du commerce.

Du maximum de la Densité de l'Eau.

260. En général, un corps a une densité d'autant plus grande que sa température est moins élevée. L'eau n'obéit pas à cette loi générale, et présente un maximum de densité à + 4 degrés centig. A dater de ce point la densité est d'autant plus faible que la température est plus basse. On démontre l'existence de ce maximum de diverses manières.

Hope, physicien anglais, a disposé dans un cylindre deux thermomètres, l'un dans la partie inférieure, l'autre près de l'ouverture. Il a rempli ce cylindre d'eau à zéro; il l'a placé ensuite dans une chambre dont la température était à 15 degrés; il a reconnu qu'au-dessous de 3°,33 dans une expérience, et de 3°,88 dans une autre, le premier thermomètre marquait une température plus élevée que la seconde; que c'était le contraire au-dessus de ces températures; d'où il conclut que la température du maximum est entre 3°,33 et 3°,88. Cette grande discordance indique un défaut, soit dans les observations, soit dans les thermomètres.

Tralès, savant suisse, place le même point à 4°,35.

MM. Gilpins et Blagden, en pesant de l'eau à diverses températures, trouvent le maximum de densité de ce liquide à 3°,88.

Lefèvre-Gineau, ayant cherché les pertes qu'éprouve un cube métallique plongé successivement dans l'eau à diverses températures, a trouvé que la perte la plus grande est à la température de 4°,44.

M. Hallestrôm a cherché les pertes subies dans l'eau à diverses températures, par une boule de verre creuse, et remplie de sable de manière à ne peser qu'un peu plus que l'eau; il a rejeté la méthode de Tralès ou de Hope, parce qu'elle lui donnait des valeurs trop discordantes.

Les valeurs extrêmes obtenues par M. Hallestrôm sont 4°,85 et 3°,4; mais la discussion de l'ensemble des expériences faites par lui et par les différens physiciens l'a conduit à 4°,1 + 0,27, c'est-à-dire à 4°,37 ou à 3°,83.

Nous nous sommes aussi occupé de ce sujet dès le commencement de 1832; nous avons employé principalement deux méthodes : la première consiste à observer les contractions éprouvées par un thermomètre à eau, correspondantes à une température du thermomètre à mercure depuis + 8° jusqu'à 0°, dans l'état statique, et à tracer une courbe avec les contractions observées; pour la construction de la courbe, on divise une ligne horizontale $A\,B$ (*fig.* 1, pl. 17) en parties égales, qui représentent les degrés du thermomètre à mercure; puis on élève, à chaque température donnée par l'expérience, une perpendiculaire proportionnelle à la contraction du liquide.

La colonne d'eau descend d'abord, mais bientôt elle remonte; ce point, qui est le *maximum* apparent, arrive quand l'eau se contracte moins que le verre. Pour déterminer le maximum absolu, on prend une hauteur AD, exprimant la dilatation du verre pour un nombre déterminé de degrés, par exemple pour 15.

La ligne DE peut alors être considérée comme représentant la dilatation du verre dans l'intervalle de 15°; cette ligne est droite, parce que dans cet intervalle la dilatation du verre est uniforme. Si maintenant l'on mène à la courbe une tangente parallèle à la ligne DE, le point de tangence correspondra à la température maximum, et les distances de cette tangente à la courbe, à droite et à gauche de ce point, seront les dilatations absolues de l'eau. J'ai employé à ces expériences quatre tubes différens. 1re série, 3°,99; 2e, 4°,02; 3e, 4°,01; 4e, 3°,98: moyenne, 4°,00. Dans la deuxième méthode je me suis servi d'un vase cylindrique en terre contenant 6 kilog. Quatre thermomètres placés horizontalement traversaient la paroi; le milieu de chaque réservoir était dans l'axe du cylindre, *fig.* 2, p. 17. On remplissait le vase d'eau à zéro ou à 10°; puis on l'exposait à l'action d'une atmosphère chaude ou froide, et l'on observait les thermomètres de minute en minute. On traçait la courbe des températures de chaque thermomètre de la manière suivante. On divisait une ligne horizontale AB en parties égales; chaque partie représentait une minute; on élevait sur cette ligne des perpendiculaires proportionnelles aux températures; on menait une courbe par les extrémités des perpendiculaires correspondantes à chaque thermomètre. J'avais pensé que ces courbes se couperaient en un seul point dont la distance à la ligne AB serait la température du maximum. Il n'en a pas été ainsi; elles se sont coupées en un grand nombre de points, et ont changé de directions plusieurs fois. Ces intersections et ces changemens ont lieu près du maximum. On obtient la température du maximum en prenant la moyenne de toutes les températures correspondantes à ces intersections et à ces changemens.

Il y a plusieurs corrections à faire : la première est relative à la position horizontale des thermomètres, dans laquelle ils indiquent une température trop élevée; la seconde est relative à l'action de l'air sur la partie de la tige non en contact avec l'eau. On détermine par l'expérience la valeur de chacune de ces corrections.

Deux expériences faites avec de l'eau à zéro, dans de l'air à + 17°,52, ont donné 3°,966.

Deux expériences faites avec de l'eau à 8°, dans de l'air à — 3°,15, ont donné 4°,032.

La différence est bien dans le sens dans lequel elle doit être; dans le premier cas, le thermomètre est un peu plus froid que l'eau; dans le second, un peu plus chaud.

La moyenne serait 3°,999, mais ce n'est pas là moyenne qu'il faut prendre; il nous paraît plus exact de diviser la différence 0°,066 proportionnellement aux vitesses de chaque expérience, qui étaient dans le rapport de 3 à 5, c'est-à-dire que, dans la première expérience, la vitesse était de 0°,03 par minute et dans la seconde de 0°,05. On tombe ainsi sur 4°,007 pour la température du maximum. La moyenne entre ce nombre et le nombre 4° fourni par les tubes est 4°,003; notre unité de poids ou le gramme est le poids d'un centimètre cubique d'eau prise à la température du maximum de densité; mais, comme il n'est pas certain que la pesée du centimètre cubique ait été faite à la véritable température du maximum, il est possible que le gramme soit faux.

Par la connaissance du maximum de densité on explique pourquoi le fond de tous les grands lacs, alimentés par les eaux provenant de la fusion des neiges, est entretenu constamment à la température de 4 degrés. A cette température l'eau, étant très pesante, tombe dans le fond. On conçoit encore également bien la formation de ces cavités cylindriques qu'on rencontre au milieu des glaciers, et qui ont été signalées par le comte de Rumford. (*Voy.* la température des mers.)

261. L'eau qui tient en dissolution une matière étrangère, par exemple un sel, ou toute autre substance, présente aussi un maximum de densité; mais comme alors l'eau gèle au-dessous de 0, le maximum est au-dessous de 4°.

Si nos expériences sont exactes, la température de ce maximum baisse beaucoup plus que la température de la congélation.

Pour 0,0123 de chlorure de sodium, congélation — 0°71; maximum à + 1°,19;

Pour 0,0246, *idem*, congélation à — 1°,41; maximum — 1°,69.

Pour 0,0370, *idem*, congélation — 2°,12; maximum — 4°,75.

Pour 0,0741, *idem*, congélation — 4°,26; maximum vers — 16°. Ainsi, pour 7 centièmes le maximum est à plus de 13 degrés au-dessous de la congélation.

(*Voyez* la fin de l'ouvrage pour une table complète de la dilatation de l'eau.)

262. La détermination de la capacité des vases se trouve naturellement placée ici. L'irrégularité des formes ne permet pas de faire usage des théorèmes de géométrie; pour cette détermination il faut avoir recours aux pesées. On peut obtenir la capacité d'un vase de deux manières; en le pesant vide d'air et plein d'eau, ou successivement plein d'air et plein d'eau. Dans le premier cas, le nombre de grammes corrigé de la température, exprimera le nombre de centimètres cubiques qui représente la capacité du vase. Dans le second, il faut y ajouter le poids de l'air du ballon, puisque ce poids a été retranché de celui du ballon plein d'eau. Nous donnerons les détails de l'expérience pour ce dernier cas.

Exemple : L'expérience est faite à 20°,1.

Poids du ballon plein d'air. . . .	542g.417
plein d'eau. . . .	6109g.559
Différence.	5567g.142
Poids de l'air contenu.	6g.650
Eau contenue dans le ballon. . .	5573g.792

Si l'on voulait tenir compte par le calcul du poids de l'air contenu dans le ballon, il faudrait connaître la densité de ce fluide comparée à celle de l'eau. Soit p le poids du ballon plein d'air; soit P' le poids du ballon plein d'eau. La différence $P' - p$ sera le poids de la quantité d'eau qu'il renferme à la température de l'expérience, moins celui du volume d'air que l'eau a chassé. Si donc P est le véritable poids de l'eau contenue dans le ballon, a le rapport entre la densité de l'air et celle de l'eau, on aura :

$$P - Pa = P' - p, \text{ d'où } P = \frac{P' - p}{1 - a}.$$

C'est là le poids de l'eau qu'on trouverait, si le ballon était d'abord pesé vide. Cette remarque est faite seulement pour mettre le lecteur en état d'apprécier l'influence de l'air; mais comme le poids de ce fluide n'est que 1/781 de celui de l'eau, on néglige presque toujours cette correction.

Si l'expérience était faite à la température du maximum de la densité de l'eau, le nombre de grammes trouvé représenterait un égal nombre de centimètres cubes, et la capacité du ballon serait 5lit., 574; mais l'eau étant dilatée par l'élévation de température, ce nombre de grammes représente une capacité plus grande que 5lit.,574. Et, d'après ce que nous avons dit sur les dilatations, il est visible que le nombre de grammes 5573,792 doit être multiplié par $1 + E(20,1 - 4)$, E étant le coefficient de la dilatation absolue de l'eau, rapportée à la température 4°, et qui est égal à 0,00029 environ. On aurait ainsi 5lit,617 pour la capacité du ballon à 20°, 1.

Si maintenant on veut connaître la même capacité à 4°, il faut tenir compte de la dilatation du vase. Nous savons qu'il s'est dilaté dans le rapport

$$1 + V.4° \text{ à } 1 + V.20,1.$$

V étant le coefficient de la dilatation du verre égal à 1/38700, il faut, pour corriger l'effet de la dilatation, le multiplier par ce rapport; ce qui donne 5lit.,599.

Perte de poids d'un corps dans l'air.

262. Soit P le poids dans le vide en grammes; d la densité; $\frac{P}{d}$ sera le volume en le nombre de centimètres cubes; soit m le poids d'un centimètre cube d'air, $\frac{Pm}{d}$ sera le poids de l'air déplacé ou la perte; $\frac{m}{d}$ n'est évidemment que la densité de l'air rapportée au corps.

Si l'on a trouvé P' pour le poids du corps, on aura $P - \frac{P}{d}m = P'$, d'où l'on tirera le poids P dans le vide.

m pris à zéro et à 0m,76 est égal à 0g.001299; sous une pression H et à la température t, il devient $\frac{0g,001299}{(1 + at)} \frac{H}{0,76}$. Si l'on voulait tenir compte de la présence de la vapeur, la formule deviendrait $\frac{0g.001299\,(H - f)}{(1 + at)\ 0,76} + \frac{0g.001299\,f}{(1 + at)0,76} \times 5/8$ ou $\frac{0,001299\,(H - 3/8\,f)}{(1 + at)\ 0,76}$. f est l'élasticité de la vapeur; elle serait donnée par le degré de l'hygromètre et les tables hygrométriques (n° 230).

Il faut aussi corriger le poids;

Soit un kilog. de platine dans le vide. Dans l'air à zéro et à 0m,76, il pèsera $1000g - \frac{1000g}{21 \times 770}$, la densité du platine étant 21.

Un kilog. en cuivre rouge pèserait $1000g - \frac{1000g}{8,88 \times 770}$, d'où l'on trouve qu'un kilogramme en cuivre rouge pèse dans l'air 0g.085 de moins qu'un kilogramme en platine.

Nous supposons l'air sec à 0° et à 0m,76. On ramènerait, comme on vient de le faire, les résultats à une température et à un état atmosphérique quelconques.

264. A l'article des densités des gaz, nous avons fait tous nos raisonnemens dans la supposition d'un gaz privé d'humidité; on peut aussi connaître les densités des gaz secs, quoiqu'on n'ait à sa disposition que des gaz humides.

Pour ne pas compliquer le problème, on suppose ordinairement les gaz complètement saturés de vapeur d'eau; il suffit alors de se rappeler que la densité de cette vapeur est, à température et à pression égales, les 10/16 de celle de l'air, et de plus qu'un espace déterminé, vide ou plein d'un gaz quelconque, admet à une température donnée la même quantité de vapeur (1).

Il résulte de là qu'on peut toujours, de la con-

(1) Soit P le poids d'un volume d'air humide à la pression H et à la température t; il s'agit d'avoir le poids du même volume de gaz sec à la pression 0m,76 et à la température de la glace fondante. Soit P' ce poids inconnu; soit f la force élastique de la vapeur que con-

naissance du poids d'un volume donné d'un gaz humide, déduire le poids d'un égal volume de ce même gaz sec, à la pression $0^m,76$ et à la température de la glace fondante. Il est donc à peu près indifférent, pour déterminer les densités des deux gaz, de peser ces gaz secs ou humides; cependant on est dans l'habitude de les dessécher préalablement afin d'éviter les calculs.

255. *Tableau des densités des corps solides et des corps liquides.*

Platine	20,722 Kl. (1)
	20,980 Br.
Or	19,258 Br.
Mercure	13,586 B. et A.
Plomb	11,352 W.
Palladium	11,3 écroui W.
	11,8 lam.
Manganèse	6,85 Be.
Nikel	8,446
	8,324 recuit.
Cobalt	8,602
Argent	10,474 Br.
	10,784 Kl.
Bismuth	9,822 Br.
	9,070 Br.
Cadmium.	8,604 St.
Cuivre	8,895 Ha.
Laiton	8,395 Br.
Arsenic	8,308 Be.
Fer	7,788 Br.
Molibdène	7,400 Hi.
Acier	7,767 Mu.
Étain	9,291 Br.
Zinc	7,166
Potassium	0,865 G. et T.
Sodium	0,772 G. et T.
Marbre	2,25 à 2,32
Spath pesant	4,3 — 4,4
Terre glaise	1,8 — 2,0
Cristal de roche	2,653 Br.
Pierre à fusil	2,58 à 2,67
Spath fusible	2,44 — 2,60
Pierre-ponce	0,914 Br.
Grès	2,11 à 2,56
Verre commun vert	2,5 — 2,6
Verre blanc	2,4 — 2,5
Cristal anglais	3,329 Br.
Cristal français	2,20 C. et B.
Verre comm. franç.	2,487 C. et B.
Oxide de fer (fer oxidulé)	5,00
Sulfure de fer (persulfure)	4,00 à 4,8
Salpêtre	1,900 Mu.
Sel ordinaire	1,918 *id.*
Sel ammoniac	1,420 *id.*
Sulfate de chaux (gypse)	2,31
Carbonate de chaux	2,70
Ambre jaune	1,065 *id.*
Soufre	1,800 *id.*
Cire	0,95 à 0,96
Alcool (absolu)	0,792 Lo.
Éther sulfurique	0,715
Huile d'olive	0,913 Mu.
Huile de térébenth.	0,872 D.
Acide nitrique	1,510 G.
	1,513 T.
Acide nitreux	1,461 Du.
Acide sulfurique	1,842
Chêne (frais)	0,93 Mu.
——— (vieux)	1,67 *id.*
Hêtre	0,85 *id.*
Sapin	0,55 *id.*
Liége	0,24 *id.*
Eau (pure)	1,000
Glace	0,916 Mu.

tient le gas humide; le poids de ce volume serait $\frac{P' \times (H - f)}{0,76}$ à la pression $H - f$. A la température t il deviendrait $\frac{P' \times (H - f)}{(1 + a t)\, 0,76}$

Il faut ajouter à ce poids celui de la vapeur que renferme le gas humide; cette vapeur remplit tout le volume d'air : elle a une force élastique f, une densité $5/8$, une température t; le poids en sera donc $\frac{5 \times P' \times f}{8\,(1 + a t)\, 0,76}$.

Ajoutant cette quantité au poids de l'air sec, on aura $\frac{P' (H - 3/8\, f)}{(1 + a t)\, 0,76}$. Égalant P' à cette expression, on aura une équation d'où l'on tirera P'.

(1) Les lettres Kl. signifient Klaproth; Br., Brisson; B. et A., Biot et Arago; W., Wollaston; Be., Bergmann; St., Stromeyer; Ha., Hatchet; Hi., Hielm; Mu., Muschenbroeck; G. et T., Gay-Lussac et Thénard; Du., Dulong; Lo., Lowitz; C. et B., Cauchoix et Biot; G., Gay-Lussac; Th., Thénard; A. et G., Arago et Gay-Lussac; D., Desprets.

266. *Tableau des densités des principaux gaz.*

NOMS des FLUIDES ÉLASTIQUES.	DENSITÉ déterminée par expérience.	NOMS des observateurs.	DENSITÉ calculée.	POIDS de 1 litre de gaz, trouvé par l'expérience, à 0° et à 0m, 76 de pression.	POIDS de 1 litre de gaz, trouvé par le calcul, à 0° et à 0m, 76 de pression.
				grammes.	
Air.	1,0000.	. . . .	. . .	1,2991.	
Oxigène.	1,1036.	B. et A. (1)	. . .	1,4337.	
Idem	1,1026.	B'. et D. .	. . .	1,4323.	
Gaz azote	0,9691.	B. et A. .	. . .	1,2590.	
Idem.	0,9757.	B'. et D. .	. . .	1,2675.	
Gaz hydrogène.	0,0688.	B'. et D. .	. . .	0,0894.	
Chlore.	2,4216.	G. et T. .	2,4260.	3,2088.	8,1516.
Gaz hydriodique.	4,4288.	G. . . .	4,3399.	5,7719.	
— fluosilicique.	3,5735.	J.-D. . .	. . .	4,6423.	
— chloroxicarbonique. . .	. . . . .	. . . .	3,3990.	. . . . .	4,4156.
Deutoxide de chlore. . . .	. . . . .	. . . .	2,3155.	. . . . .	3,0081.
Gaz fluoborique	2,3709.	J.-D. . .	. . .	3,0800.	
— sulfureux.	2,1930.	H.-D. . .	. . .	2,8489.	
— sulfureux.	2,234.	T. . . .			
Cyanogène.	1,8064.	G. . . .	1,8197.	2,3467.	2,3640.
Protoxide d'azote.	1,5269.	C. . . .	1,5269.	1,9752.	1,9836.
Acide carbonique.	1,5196.	B. et A. .	. . .	1,9741.	
Idem	1,5245.	B'. et D. .	. . .	1,9805.	
Gaz hydrochlorique. . . .	1,2474.	B. et A. .	1,2474.	1,6205.	
— hydrosulfurique. . . .	1,1612.	G. et T. .	. . .	1,5475.	1,6205.
Deutoxide d'azote.	1,0388.	B'. . . .	1,0390.	1,3495.	1,3498.
Hydrogène bi-carboné . . .	. . . . .	. . . .	0,9816.	. . . . .	1,2752.
Oxide de carbone.	0,9569.	C'. . . .	0,9732.	1,2431.	1,2643.
Hydrogène per-phosp. . . .	1,7. . .	Dum. . .			
Hydrogène proto-phosp. . .	1,2. . .	*Idem* . .			
Idem	0,9716.	T' . . .			
Gaz ammoniacal	0,5967.	B' et A. .	0,5910.	0,7752.	0,7678.
Hydrogène proto-carbu. . .	. . . . .	. . . .	0,5596.	. . . . .	0,7270.
Hydrogène arséniqué. . . .	2,695.	Dum. . .			

Les densités de la quatrième colonne ont été calculées en ajoutant les poids des élémens des gaz composés.

Ainsi, un volume d'oxide de chlore est formé d'un volume d'oxigène et d'un demi-volume de chlore. Il faut donc réunir le poids d'un volume d'oxigène 1,102 à celui de 1/2 volume de chlore ou 1,211, ce qui fait 1,314 pour la densité du gaz. Le gaz ammoniacal est formé d'une partie et demie d'hydrogène et d'une demi-partie d'azote. Le poids d'une partie et demie d'hydrogène est égal à 0,102; celui d'une demi-partie d'azote est égal à 0,487; la somme de ces deux nombres fait 0,589; ce qui diffère peu de 0,596, trouvé directement.

De la même manière on trouverait les densités des autres gaz composés.

(1) Les lettres B. et A. signifient Biot et Arago; B et D'., Berzélius et Dulong; B'., Bérard; C. Colin; C. et R., Colin et Robiquet; C', Cruikshancks; G., Gay-Lussac; G. et T., Gay-Lussac et Thénard; J. D., John Davy; T., Thénard; Dum., Dumas; T., Trommsdorff.

DE L'ATMOSPHÈRE.

267. L'air atmosphérique est un composé d'oxigène et d'azote, dans le rapport de 21 à 79. Il contient toujours dans la nature plus ou moins de vapeur d'eau, dont nous avons appris à reconnaître la présence et même la quantité; voyez *Hygrométrie* (n° 224). Il renferme aussi toujours une très petite quantité d'acide carbonique, provenant de la respiration des animaux et d'autres sources. Enfin il doit renfermer plus ou moins des principes odorans exhalés des plantes. Nous reviendrons sur ce sujet à l'article de la *Météorologie* (fin de l'ouvrage).

L'air vu sous une certaine épaisseur paraît bleu, et donne cette couleur à la voûte céleste, laquelle prend une teinte d'autant plus obscure qu'on l'élève plus dans l'atmosphère.

Nous avons parlé des propriétés des gaz de la pression de l'atmosphère n°s 47, 50, 58.

Du Décroissement de la densité de l'Atmosphère.

268. *Les hauteurs de l'atmosphère croissant en progression arithmétique, les densités correspondantes de l'air décroissent en progression géométrique.* En effet, supposons que $A\ H$ (*fig.* 159) représente la hauteur de toute l'atmosphère, c'est-à-dire que cette droite soit tirée verticalement depuis le sol jusqu'aux confins de l'atmosphère, et supposons en outre qu'on ait mené perpendiculairement à cette droite des lignes horizontales à égales distances les unes des autres, représentant les différentes couches de l'atmosphère. Soient P le poids de toute la colonne de l'atmosphère qui presse sur la surface de la terre, P' le poids de toute la colonne d'air qui pèse sur la première couche, P'' celui de toute la colonne d'air qui pèse sur la seconde couche, et ainsi de suite; soient D la densité de la première couche, D' la densité de la seconde, D'', celle de la troisième, D''' celle de la quatrième, etc...; $P - P'$ sera le poids de la première couche inférieure, $P' - P''$ sera le poids de la seconde, $P'' - P'''$ celui de la troisième, et ainsi de suite. Or les poids de deux volumes égaux d'un même gaz sont proportionnels aux densités; on aura donc la proportion : $P - P'$ est à $P' - P''$, comme $D : D'$; mais déjà $D : D' :: P : P'$. Donc à cause du rapport commun de ces deux proportions, $P - P' : P' - P'' :: P'' : P'$; d'où $P\,P'' - P'\,P'' = P'^2 - P'\,P''$; ou bien $P.\,P' = P'^2$, égalité d'où l'on tire $P : P' :: P' : P''$. On trouverait de même $P' : P'' :: P'' : P'''$, et ainsi de suite; d'où l'on tire les égalités $\frac{P}{P'} = \frac{P'}{P''} = \frac{P''}{P'''} =$, etc., ce qui peut être écrit $\div\ P : P' : P'' : P'''$..., etc.; qui est évidemment une progression géométrique décroissante; mais les densités sont proportionnelles aux pressions; ainsi la proposition énoncée est démontrée, c'est-à-dire que les densités des différentes couches d'air sont en progression géométrique décroissante. Il faut dire toutefois que cette progression n'a jamais rigoureusement lieu dans la nature, parce que la température décroît en général avec l'élévation au-dessus de la surface. (*Voyez*, dans les notes, la mesure des hauteurs par le baromètre.)

On a d'abord été embarrassé pour concevoir la limitation de l'atmosphère; mais il faut remarquer que l'air est pesant et élastique, en sorte que l'atmosphère est borné là où il y a équilibre entre le poids de la dernière couche et l'élasticité de celles qui sont au-dessous.

Du Baromètre.

269. L'invention du baromètre est due à Torricelli. Ce savant disciple de Galilée, méditant sur la cause de l'ascension de l'eau dans les pompes, eut l'heureuse idée de comparer la hauteur du mercure dans un baromètre à la hauteur de l'eau dans les pompes, et trouva que le rapport des deux hauteurs était dans le rapport inverse des densités; de sorte que l'eau, qui pèse 13,586 moins que le mercure, s'élève à une hauteur 13,586 fois plus grande. Torricelli conclut de ce fait que c'est réellement, comme il avait soupçonné, la pression de l'atmosphère qui détermine l'eau et le mercure à s'élever jusqu'à ce qu'il y ait équilibre.

Cette importante découverte date de 1643. Peu

de temps après l'expérience fut répétée, en 1646, par Mersenne et Pascal; l'année suivante, Pascal imagina de la rendre plus décisive en la faisant à différentes hauteurs. Il vit baisser le mercure, à mesure que le baromètre était porté à des hauteurs plus grandes. L'explication de Torricelli fut donc pleinement confirmée; il fallut renoncer à l'idée d'horreur de la nature pour le vide.

L'usage du baromètre est indispensable dans une infinité d'expériences, par exemple dans toutes celles où l'on opère sur les matières aériformes. Nous avons déjà eu occasion de nous servir de cet instrument plusieurs fois dans les parties précédentes de cet ouvrage.

Des différentes espèces de Baromètres.

270. Il existe deux espèces de baromètres : le baromètre à cuvette, le baromètre à siphon.

Du Baromètre à cuvette.

271. Le baromètre à cuvette consiste en un tube de verre large de quelques lignes, long d'environ trois pieds, fermé par un bout, ouvert par l'autre, et plongé verticalement par son extrémité ouverte dans une cuvette remplie de mercure, de manière qu'une partie de ce liquide se tient à une certaine hauteur dans le tube en vertu du poids de l'atmosphère qui pèse sur la surface du bain. Avant de placer le tube dans cette position, il faut le sécher autant que possible; puis verser une petite quantité de mercure déjà bouilli, et l'y faire bouillir de nouveau afin de chasser tout l'air adhérant au tube et même mêlé au métal, puis y verser une nouvelle quantité du même mercure, le faire bouillir de nouveau, et ainsi de suite jusqu'à ce que le tube soit complètement plein; on remplit ainsi le tube en six ou huit ébullitions. Ensuite on renverse ce tube bien purgé d'air et de vapeur d'eau dans une cuvette également pleine du même métal; le mercure contenu dans le tube descend jusqu'en un certain point où il se fixe bientôt, laisse au-dessus de lui un espace vide, abstraction faite de la faible élasticité de la vapeur de ce métal à la température ordinaire. L'opération précédente est laborieuse; elle demande de grandes précautions et en outre beaucoup d'habitude dans ces sortes d'expériences. (1).

Il ne reste plus maintenant qu'à mesurer exactement la hauteur de la colonne barométrique. Or, comme on ne peut le faire qu'au moyen d'une échelle graduée, il faut que le zéro de cette échelle soit toujours en contact avec la surface du mercure dans la cuvette : on voit donc qu'il faut rendre mobile l'échelle ou la cuvette. M. Fortin, dans la construction de ses baromètres, rend la cuvette mobile, en lui donnant simplement un fond en peau souple, qui s'élève ou s'abaisse par le moyen d'une vis *A* (*fig.* 161), ce qui fait monter ou descendre le niveau du mercure dans la cuvette. Par ce moyen on peut toujours amener ce niveau tangentiellement à l'extrémité inférieure d'une petite pointe d'ivoire *I* fixée invariablement, et correspondant au zéro de l'échelle. Cette échelle est fixe et tracée sur un tube de cuivre qui entoure et protége le tube barométrique; ce tube de cuivre est fendu dans le sens de sa longueur, afin que l'on puisse apercevoir la colonne de mercure.

Il est essentiel que l'instrument soit tenu dans une position verticale. Pour cela, on l'attache par sa partie supérieure à un point fixe, et on le laisse pendre librement; il est d'ailleurs renfermé dans un étui qui se partage en trois parties, et qui peut servir de support. Quand on veut faire une observation, on ouvre l'étui, on en pose les trois parties sur le sol, et le baromètre se met de lui-même dans la verticale.

Au moyen de cette monture, on observera donc, avec la plus grande facilité, la hauteur de la colonne de mercure dans le tube barométrique; mais, pour que toutes les observations soient comparables entre elles, il faut les ramener à une même température. On choisit zéro, parce que c'est à dater de ce point que les dilatations sont estimées; on connaît la température du mercure et de l'échelle par le moyen d'un thermomètre enchâssé dans l'enveloppe de l'instrument. Or, ici il faut avoir égard non seulement à la dilatation du mercure, mais encore à celle du métal sur lequel est tracée l'échelle. La dilatation du mercure diminuant la densité de ce métal, rend la hauteur observée trop grande; celle de l'échelle la rend trop petite; car chaque division de l'échelle s'étant dilatée d'une certaine quantité, le nombre des divisions nécessaire pour égaler la hauteur de la colonne de mercure est évidemment moindre à la température t à laquelle on opère, qu'il ne le serait à 0°; pour l'échelle, il est clair qu'il faut prendre seulement la dilatation linéaire, puisqu'on ne considère que la longueur; tandis que, pour le mercure, on doit employer la dilatation cubique. D'après cela, représentons par h la hauteur de la colonne de mercure observée dans le tube à une certaine température t, et supposons que k soit le coefficient 1/5550 de la dilatation cubique du mercure. Comme les volumes d'une même masse de matières sont en raison inverse des densités; et que les densités sont ici en raison inverse des hauteurs, il en résulte que les volumes sont proportionnels aux hau-

(1) Quand l'ébullition est soutenue trop long-temps, la surface du mercure est concave, comme l'a remarqué M. Gasbois, tandis que le mercure pur présente une surface convexe. M. Dulong a reconnu récemment que dans le premier cas le mercure s'oxide, et que l'oxide formé se dissout dans le mercure. Ce mélange d'oxide et de métal se comporte comme un liquide qui mouille le verre. (*Voyez* les Tubes capillaires.)

teurs. Si par conséquent nous représentons par 1 le volume de la colonne de mercure à 0°, $1 + kt$ sera le volume de cette même colonne à t degrés, et la hauteur x du mercure à 0° sera donnée par la proportion

$$1 : 1 + kt :: x : h,$$

d'où l'on tirera $x = \frac{h}{1 + kt}$. Soit de même k' le coefficient de la dilatation linéaire du cuivre : ici la hauteur observée sera en raison inverse de la longueur d'une division; or, si 1 est cette longueur à 0°, à t degrés elle sera $1 + k't$; on aura donc la proportion $1 : 1 + k't :: \frac{h}{1 + kt} : x''$; d'où l'on tirera enfin, pour la véritable hauteur du mercure à 0°, $x' = h\frac{(1 + k't)}{1 + kt}$.

Il est inutile d'avoir égard à la dilatation du tube de verre, puisque nous savons (n° 40) que la hauteur de la colonne de mercure dans le baromètre est indépendante de la largeur du tube.

Application. Un baromètre dont l'échelle est en cuivre marque 0m, 762 à 22°,

$K = \frac{1}{59200}$ pour chaque degré centigrade.

$k = \frac{1}{5550}$ *id.*

En substituant aux lettres les valeurs numériques dans la formule, on obtient 0m, 759 pour la hauteur ramenée à zéro.

Quand on veut transporter l'instrument d'un lieu dans un autre, il suffit d'élever le fond mobile de la cuvette jusqu'à ce que le tube et le réservoir soient pleins. Par ce moyen, ce tube se trouvant complètement rempli de mercure, il est visible que, quelque secousse qu'il reçoive dans le transport, il ne pourra être brisé par les oscillations du liquide qu'il contient, ce qui serait à craindre s'il y avait dans la partie supérieure du tube le moindre espace vide, et en outre l'air ne pourra s'y introduire en aucune façon. Il est bon de remarquer que le tube est légèrement étranglé dans le haut, afin que dans les petits déplacemens le mercure ne frappe pas brusquement le fond du tube.

Pour que toutes les observations soient comparables, on doit encore tenir compte de l'action capillaire (n° 67).

Tableau des dépressions du Mercure dans le Baromètre, dues à la capillarité.

Diamètre intérieur des tubes en millim.	Dépression en millim.	Diamètre intérieur des tubes en millim.	Dépression en millim.
2	4,56	12	0,26
3	2,90	13	0,20
4	2,04	14	0,16
5	1,51	15	0,12
6	1,15	16	0,10
7	0,88	17	0,08
8	0,69	18	0,06
9	0,54	19	0,05
10	0,42	20	0,04
11	0,35		

La dépression est indiquée dans cette table pour les divers diamètres que les tubes de baromètre peuvent avoir depuis deux jusqu'à vingt millimètres. Quand on observe la hauteur d'un baromètre, il faut ajouter à la hauteur la dépression qui correspond au diamètre du tube.

Du Baromètre à siphon.

272. Le baromètre à siphon, ainsi nommé à cause de sa forme, n'a pas de cuvette, ou plutôt le tube lui-même en tient lieu; il est recourbé par le bas en C (*fig* 162), et formé par conséquent de deux branches $C\,A$ et $C\,B$. Pour obtenir cette disposition, on prend un tube, le plus cylindrique possible, fermé par un bout et ouvert par l'autre. On lui donne la forme d'un siphon en le courbant à la lampe d'émailleur, et l'on fait en sorte que l'extrémité ouverte appartienne à la branche la plus courte, l'autre branche ayant plus de 28 pouces. Cela posé, si B est le point où le mercure monte dans la branche fermée, et A celui où il se tient dans la branche ouverte, la différence $A\,B$ des niveaux de ces deux colonnes de mercure est la hauteur barométrique. La longueur de cette colonne de mercure ne peut se mesurer qu'au moyen d'une échelle que l'on fait mouvoir parallèlement à la branche $C\,B$, de manière à amener le zéro des divisions au niveau de l'extrémité A de la colonne de la plus courte branche.

Le baromètre à siphon a surtout cet avantage sur le baromètre à cuvette, d'être indépendant de l'action capillaire; car les deux branches ayant sensiblement le même diamètre intérieur, puisque le tube rectiligne dont on les a formées a été choisi aussi cylindrique que possible, et que de plus la courte branche a été prise sur la partie supérieure de la plus grande branche, les tendances à la dépression sont donc égales de part et d'autre, et se contre-balancent mutuellement. Mais il a un inconvénient, c'est d'être moins sensible que le baromètre à cuvette, puisque la variation du niveau dans l'une des branches n'est que la moitié de ce qu'elle est dans cet autre instrument.

Pour rendre portatif le baromètre à siphon, on avait adapté un robinet à la branche ouverte. L'inconvénient de cette disposition est de salir le mercure, par la matière grasse nécessaire au jeu du robinet. M. Gay-Lussac a évité l'emploi d'un robinet

et conséquemment d'une matière grasse de la manière suivante : il réunit les deux branches *A B* et *E C* du baromètre (*fig.* 163) par un tube *B C* d'un diamètre beaucoup plus petit (1 à 2 millimètres). La courte branche fermée à sa partie supérieure est percée latéralement d'une ouverture capillaire *E* en forme d'entonnoir. Cette ouverture, suffisante pour permettre à la pression atmosphérique de s'exercer, est trop petite pour laisser échapper le mercure quand on renverse le baromètre (*fig.* 164). On met l'instrument dans cette position quand on le veut transporter d'un lieu dans un autre ; s'il s'introduit une petite quantité d'air dans le tube capillaire *B C D*, comme le montre la *fig.* 165, cet air est chassé par le mercure, quand on remet l'instrument dans sa position naturelle (*fig.* 163). M. Gay-Lussac et M. Descotils se sont servis d'un instrument de ce genre dans plusieurs voyages, sans qu'il ait paru s'altérer. Cependant quelques physiciens se sont aperçu qu'au bout d'un certain temps il s'introduit de l'air dans le haut de la plus grande branche. Pour remédier à cet inconvénient, M. Bunten, artiste distingué de Paris, a soudé dans la grande branche un tube effilé, comme l'indique la *fig.* 166 : l'air se loge alors dans l'espace *m K*, d'où il est toujours possible de le faire sortir en secouant l'instrument ; d'ailleurs la présence de ce fluide en *m*, pourvu que la colonne métallique ne soit pas divisée, n'a pas d'influence sur la hauteur du mercure. Il est vrai que cette dernière disposition rend très difficile la construction du nouveau baromètre. L'instrument peut être renfermé dans un étui en métal, fendu dans une partie de sa longueur, sur lequel est tracée l'échelle, ou bien même dans une canne.

Du Baromètre à cadran.

273. Le baromètre à cadran (*fig.* 167) ne diffère du baromètre à siphon dont nous venons de parler, qu'en ce que, au-dessus de l'orifice de la plus courte branche, se trouve une petite poulie *A*, parfaitement mobile, et dont le centre est fixé à celui d'un cadran derrière lequel est attaché le baromètre. Cette poulie correspond à une aiguille destinée à parcourir les divisions du cadran ; sur la circonférence de cette poulie est enveloppé un fil, aux extrémités duquel sont suspendus deux petits poids *p* et *p'*, dont l'un pénètre dans l'intérieur du tube, et dont l'autre est libre au dehors. Le poids extérieur *p'* équilibre le poids *p*, et le système de ces deux poids, parfaitement mobile autour de la poulie *A*, est tel que le poids *p* ne fait que poser sur la surface du mercure, sans jamais le déprimer en aucune manière.

D'après cette disposition, il est clair que quand le mercure s'abaisse dans la branche ouverte et s'élève dans l'autre, c'est-à-dire quand l'atmosphère augmente en pesanteur, le poids *p* doit descendre avec le mercure, et l'extrémité de l'aiguille occuper la partie supérieure du cadran. Dans le cas contraire, le poids *p* doit monter avec lui, et l'aiguille se placer dans la partie inférieure du cadran : enfin, quand le mercure sera à une hauteur moyenne, l'aiguille prendra une position intermédiaire. Comme par une longue suite d'observations on a remarqué que, lorsque le mercure monte ou descend dans le baromètre, c'est ordinairement un signe de beau ou de mauvais temps, on a marqué mauvais temps le point le moins élevé du cadran, beau temps le point le plus élevé, et variable le point intermédiaire.

Avant d'observer ce baromètre, il est bon de le frapper doucement, pour vaincre le frottement des différentes parties. Quoi qu'il en soit, ce baromètre ne doit pas être employé dans les observations qui exigent une grande exactitude.

274. On a reconnu que la hauteur la plus commune du baromètre au niveau de l'Océan, lorsque le temps est calme, est 0^m, 7629, ou 28 pouces environ ; c'est cette hauteur que l'on a choisie pour la hauteur moyenne. Mais il n'en est pas de même quand le temps est agité et voisin de la tempête : la hauteur du baromètre éprouve alors des variations continuelles.

275. Il ne nous reste plus maintenant qu'à faire connaître la manière dont on rassemble comparativement de longues suites d'observations sur la marche du baromètre. Le tracé graphique est le procédé le plus commode. On se sert pour cela d'une bande de papier, au milieu de laquelle on trace une ligne droite *A B* (*fig.* 158 *bis*) qui la traverse d'un bout à l'autre : on la divise en un certain nombre de parties égales, destinées à représenter des jours ; par les points des divisions, on élève des perpendiculaires prolongées au-dessus et au-dessous de cette droite, parallèlement à elles-mêmes, et des deux côtés de cette ligne on en trace plusieurs autres à des distances égales.

Cela fait, lorsqu'on a observé le baromètre un certain jour, si la hauteur est moyenne, c'est-à-dire 0^m,760, on marque le point *A* de la ligne principale qui correspond à ce jour-là. Si elle est plus haute, par exemple d'un millimètre, on monte à la première parallèle au-dessus de *A B* ; si elle est moindre, on redescend à la parallèle qui lui correspond au-dessous de cette même ligne. On porte ainsi les observations de tous les jours successifs, chacun au rang et à la hauteur qui lui conviennent : par tous les points *A, b, c, d, e*... on trace la ligne brisée *A b c d e*... Cette ligne, par ses diverses sinuosités, représente fidèlement l'état du baromètre dans les époques successives auxquelles on a observé. C'est par l'inspection d'un pareil tableau que l'on voit que dans un grand nombre de cas, lorsque le baromètre a baissé, il est tombé de la pluie ; et qu'au contraire, lorsqu'il s'est élevé, le temps est devenu serein. On aperçoit cependant par intervalle des exceptions à cette règle ; mais elles sont rares.

C'est encore par des observations de ce genre qu'on a reconnu que le baromètre, malgré toute l'irrégularité de sa marche, est cependant soumis à une cause qui le fait monter et descendre périodiquement à certaines heures du jour. Ainsi cet instrument atteint son maximum de hauteur vers neuf heures du matin, après quoi il descend jusque vers quatre heures du soir, où il atteint son minimum de hauteur. Puis il recommence à monter jusque vers onze heures du soir, où il atteint de nouveau son maximum. Ensuite il redescend jusque vers quatre heures du matin, où il atteint encore son minimum pour revenir à son maximum de hauteur vers neuf heures, et ainsi de suite; ce qui résulte particulièrement d'observations faites en Amérique par M. de Humboldt, et en France par M. Ramond. Cette marche régulière est souvent troublée en Europe, où l'état de l'atmosphère est très variable; mais sous les tropiques la période est beaucoup plus constante, et à tel point que, d'après M. de Humboldt, le baromètre pourrait servir à indiquer l'heure du jour.

On observe qu'en Europe le maximum du matin a lieu vers neuf heures en hiver et à huit heures en été.

Pour des observations sur les variations dans un même lieu, le baromètre incliné est fort commode. La hauteur du mercure dans ce baromètre étant à la hauteur du baromètre vertical comme 1 : cos *lcl'*, les variations seront aussi plus grandes dans le même rapport (*fig.* 160)

Nous citerons quelques autres baromètres, non à cause de leur utilité, mais parce qu'ils sont une application des principes que nous avons vus dans les Préliminaires.

276. Le *baromètre d'Amontons* consiste en un tube conique, de 30 pouces environ (*fig.* 158 *ter*), le mercure s'y soutient à la même hauteur à peu près que dans le baromètre ordinaire. Si la pression atmosphérique augmente, la colonne s'élève et s'allonge. Si cette pression diminue, la colonne baisse et se raccourcit. L'action capillaire, produisant un effet variable avec la différence des diamètres *m* et *n*, est fort difficile à estimer. On rendrait cette action constante en donnant au baromètre la forme de la *fig.* 157 *bis*; le seul avantage de cet instrument serait de donner des variations de hauteur plus grandes que dans le baromètre ordinaire; mais il aurait le grand inconvénient de se diviser par l'introduction de l'air. Si *d* représente le diamètre du petit tube, *D* celui du grand, *s* la variation du niveau du mercure dans le petit tube, *y* la variation réelle du baromètre, on aura

$$y = s - \frac{d}{D} s, \text{ d'où } s = \frac{y\,D}{D-d}$$ dont la valeur sera d'autant plus grande que *D* différera moins de *d*. La figure montre l'instrument dans une situation renversée.

277. Le *baromètre de Descartes* est plus compliqué; la *figure* 166 *bis* le représente. Le tube est rempli de mercure jusqu'en *H*; au-dessus est un liquide plus léger jusqu'en *l*; les variations du niveau au point *l* seront nécessairement plus grandes que dans un baromètre ordinaire. Pour fixer les idées, supposons le diamètre de *g l* cent fois plus petit que celui de *K H*; quand le mercure s'élèvera de 1^{mm} en *H K*, le liquide du tube *g l* s'élèvera de 100^{mm}; l'élévation totale sera $1^{mm} + 99^{mm}$; en sorte que si la densité du liquide supérieur est 1/10 de celle du mercure, la variation totale équivaudra à $10^{mm},9$ de mercure (1). Nous remarquerons qu'il faudrait tenir compte de l'élasticité de la vapeur, qui serait variable avec la température.

Huyghens, Farenheit, Cassini, Bernouilli, ont aussi proposé chacun un baromètre d'une espèce particulière, mais ces divers instrumens n'ont plus d'application aujourd'hui.

278. Le *baromètre différentiel* proposé par Hyde Wollaston est formé d'un tube de verre de trois lignes de diamètre intérieur et recourbé en forme de siphon (*fig.* 158 *quater*. 1). Chacune de ses extrémités est lutée à un réservoir de deux pouces de diamètre. Un de ces réservoirs est fermé de tous côtés, à l'exception d'une petite ouverture percée dans la partie supérieure de sa paroi latérale : cette ouverture reçoit un tube horizontal. L'autre réservoir est ouvert. La partie recourbée du siphon est remplie d'eau. Le reste du siphon et les réservoirs, jusqu'à la hauteur d'un 1/2 pouce environ, sont remplis d'huile. On amène le niveau de l'eau dans chaque branche à la même hauteur. Si l'on applique le tube horizontal au trou d'une serrure, ou à quelque autre ouverture percée dans une cloison, qui sépare deux portions d'atmosphère dans lesquelles la pression est inégale, le fluide dans la moitié correspondante sera déprimé. La *fig.* 158 *quater*. 2 représente l'état du baromètre quand l'atmosphère qui presse en *A* l'emporte sur celle qui presse en *B*. Les points *n* et *n'* ne sont plus sur une même ligne horizontale. Dans ce cas, l'excès de la pression en *A* plus la colonne d'huile *m n* fait équilibre à la colonne d'eau *n' v* plus à la colonne d'huile *m' n'*.

Soient *d* la pesanteur spécifique de l'huile, *a* l'abaissement du niveau dans la cuvette *A*, *l* la longueur de la colonne d'huile *m n*, *A* la longueur de l'abaissement du niveau de l'eau *N' n*, qui est égal à l'élévation *N n'*, enfin *x* la hauteur de la colonne d'eau qui mesure la différence de la pression cherchée, on aura : $x + d\,l = 2\,A + d\,(l + 2\,a - 2\,A)$; d'où $x = 2\,A\,(1 - d) + 2\,a\,d$.

(1) Soit *h* la variation du baromètre ordinaire, *r* le rapport entre le diamètre de *K H* et celui de *g l*; *d* la densité du mercure par rapport au liquide, *x* la variaton du niveau dans le tube *gl*, on aura la relation $\frac{x}{d} - \frac{x}{rd} + \frac{x}{r} = h$.

Si le siphon ne renfermait qu'un seul liquide, on aurait $d = 1$, d'où $x = 2\,a$; c'est-à-dire que la pression serait égale à la différence de niveau dans les deux cuvettes A et B, ce qui est évident.

Si R est le diamètre de la cuvette A, et r celui du siphon, on aura :

$A r^2 = a R^2$, d'où $a = \frac{A r^2}{R^2}$. Cette équation servira à donner a par A, quand l'abaissement dans la cuvette sera trop petit pour être mesuré directement.

Ce baromètre sera d'autant plus sensible que la différence des densités entre les deux liquides sera moindre.

(*Voy.*, pour plus de détails, dans le *Bulletin de la société d'Encouragement*, 1829, p. 281, une note de M. Hachette.)

De la Machine Pneumatique.

279. La machine pneumatique, dont l'invention est attribuée à Otto de Guérick, est un instrument propre à raréfier l'air contenu dans un espace déterminé. Dans son origine, elle était loin d'être ce qu'elle est aujourd'hui : elle consistait simplement en un cylindre creux $A\ C$ (*fig.* 177), appelé corps de pompe, dans lequel glissait à frottement un piston P, mû au moyen d'une tige T. A la base inférieure de ce corps de pompe, se trouvaient deux petits conduits : à l'un d'eux était adapté un robinet R : à l'autre, aussi muni d'un robinet R', était vissé le col du récipient dont on voulait raréfier l'air. On ouvrait le robinet R et l'on fermait le robinet R' quand on abaissait le piston. On fermait le premier et l'on ouvrait le second quand on l'élevait, en sorte qu'au bout d'un certain temps on avait enlevé presque tout l'air du récipient.

Mais l'embarras d'ouvrir et de fermer ainsi à chaque instant ces deux robinets était un grand inconvénient; on les a d'abord remplacés par deux soupapes A et A' (*fig.* 178), l'une placée dans le piston, l'autre dans l'intérieur du corps de pompe, toutes deux s'ouvrant de dedans en dehors.

280. La soupape A' présente un inconvénient que n'avait pas le robinet qu'elle remplace, c'est celui de ne plus se soulever après un certain nombre de coups de piston. On conçoit, en effet, que la force élastique de l'air intérieur du récipient B devienne assez faible pour ne plus vaincre la résistance de cette soupape; on ne peut donc pas faire le vide au delà de ce terme. Aussi cette soupape n'est-elle plus en usage dans les machines pneumatiques : on l'a remplacée par un petit cône tronqué solide qui remplit exactement l'ouverture de même forme que lui, du conduit qui communique au récipient; ce petit cône est fixé à l'extrémité d'une tige métallique tt' qui traverse le piston à frottement (*fig.* 169). De cette manière, quand on baisse le piston, la tige tt' s'abaisse avec lui, amène le cône tronqué dans l'embouchure du conduit, et le piston, surmontant le frottement de la tige tt', continue de s'abaisser; lorsqu'au contraire on élève le piston, la tige tt' s'élève avec lui, et le cône tronqué, sortant de son embouchure, donne un passage à l'air du récipient, quelque faible que soit la force élastique. Mais le piston P monte bientôt sans élever davantage la tige tt', qui est arrêtée par la partie supérieure du corps de pompe. Enfin on a remplacé aussi la soupape S par une autre soupape métallique, fixée dans l'intérieur du piston, et qui se referme sur elle-même au moyen d'un petit ressort.

281. Cette machine n'est pas encore très commode dans la pratique. Quand on commence à faire le vide dans le récipient, l'air intérieur qu'il contient ayant à peu près la même force élastique que l'air extérieur, on n'a aucune peine à soulever le piston. Mais lorsqu'on a fait le vide à un certain degré, l'air intérieur du récipient a une force élastique très faible. Le piston doit soulever le poids de l'atmosphère; on voit qu'il faut faire un effort très considérable pour l'élever dans le corps de pompe. On remédie à cet inconvénient dans les machines que l'on construit aujourd'hui, en employant deux corps de pompe qu'on fait communiquer par un même conduit avec le récipient (*fig.* 170). Ces deux corps de pompe sont parfaitement égaux, et dans leur disposition intérieure ils ne diffèrent nullement du précédent; seulement les tiges des deux pistons sont à crémaillère et engrènent avec une même roue dentée, que l'on fait mouvoir au moyen d'un double bras de lévrier MM', tournant autour de l'axe de la roue. La roue dentée, entraînée par le mouvement du levier, fait marcher à la fois les deux pistons; si l'un monte, l'autre descend. Comme l'atmosphère pèse également sur celui qui monte et sur celui qui descend, il en résulte que l'effort nécessaire pour faire jouer cette machine reste toujours à peu près le même.

282. Quelle que soit la perfection d'une machine pneumatique, on ne parvient jamais à faire le vide entièrement dans le récipient, puisqu'il faudrait, pour enlever rigoureusement tout l'air du récipient, faire jouer les pistons pendant un temps infini; mais bientôt on arrive à la limite, parce que, outre que la soupape du piston ne cède plus quand le ressort de l'air est très affaibli, l'huile destinée à faciliter le jeu des pistons se réduit en partie à l'état de gaz. En sorte qu'on ne fait guère le vide dans les meilleures machines qu'à 1 millimètre près. On construisait autrefois des machines d'épuisement à l'aide desquelles on portait le vide plus loin. Ces machines, dont la construction était un peu compliquée, ont été abandonnées. M. Babinet vient d'imaginer un nouveau mécanisme qui permet, sans beaucoup compliquer la machine, de porter le vide plus loin qu'on ne le fait ordinairement. Chaque corps de pompe communique avec

le récipient par un conduit particulier; et quand on est à peu près arrivé à la plus grande raréfaction possible avec la machine ordinaire, on détruit par le moyen d'un robinet la communication avec l'un des corps de pompe et le récipient, et l'on établit une communication entre les deux corps de pompe.

On continue à faire jouer les deux pistons. Celui qui ne communique plus avec le récipient épuise l'air de l'autre corps de pompe.

Soit a la masse d'air qui reste quand la machine ordinaire cesse d'être efficace; R la capacité de chaque corps de pompe; r l'espace laissé au-dessous du piston quand celui-ci est au plus bas point de sa course, $\frac{a}{r}$ sera la densité de l'air atmosphérique ou de l'air avant qu'on mît la machine en jeu; $\frac{a}{R}$ sera la densité de l'air raréfié; conséquemment $\frac{r}{R}$ sera la mesure de la raréfaction. Dans la machine de M. Babinet, l'air du corps de pompe, qui conserve une communication avec le récipient dans une position du robinet, passe dans l'autre corps de pompe dans une position différente de ce robinet. En sorte que dans la capacité r il ne restera que $\frac{a}{R} \cdot \frac{r}{R}$; ainsi, le pouvoir raréfiant de la machine modifiée est au pouvoir raréfiant de la machine ordinaire comme r est R, et ce pouvoir peut être exprimé par $\left(\frac{r}{R}\right)^2$; puisqu'on a $\frac{r}{R} : x :: r : R$, x étant le pouvoir cherché.

283. Pour qu'on puisse juger à chaque instant du degré de raréfaction, on établit la communication entre l'intérieur du récipient de la machine et la partie supérieure d'un baromètre à cuvette $A\ B$ (*fig.* 170) : ce baromètre fait partie de la plupart des machines, mais il est disposé de telle manière qu'on peut l'enlever à volonté. Lorsqu'on n'a pas encore fait jouer la machine, le niveau dans l'intérieur du tube est le même qu'à l'extérieur; mais à mesure qu'on fait mouvoir le piston, la force élastique de l'air intérieur du récipient diminuant, le mercure monte nécessairement dans le tube. Soit h la hauteur du mercure dans le baromètre adapté à la machine; p la pression de l'atmosphère; l'élasticité de l'air intérieur sera $p-h$; avant qu'on eût raréfié l'air du récipient, il occupait le même volume sous la pression p: et comme les poids d'un même volume d'air sont proportionnels aux pressions, $1 \times \frac{p-h}{p}$ sera le poids de l'air resté dans le ballon, 1 étant le poids primitif de l'air.

Il y a aussi des machines pneumatiques dans lesquelles on juge du degré du vide au moyen d'un instrument appelé *éprouvette* ou *baromètre raccourci*, qu'on renferme sous une petite cloche. Cette cloche est fixée hermétiquement sur un pied, creux intérieurement, communiquant avec le récipient et les corps de pompe. Cet instrument se compose d'un tube $B\ C\ A$ (*fig.* 171) recourbé en forme de siphon, et haut environ de 8 à 10 pouces. L'une des branches $C\ B$ est fermée, l'autre $C\ A$ est ouverte, et il y a du mercure en assez grande quantité pour que la branche fermée en soit entièrement remplie. Quand l'air de l'intérieur de la machine sera assez raréfié pour ne plus soutenir le mercure jusqu'au haut de la branche fermée, ce métal baissera dans celle-ci; mais il sera toujours plus haut dans cette dernière que dans la branche ouverte. La différence des niveaux, mesurée au moyen d'une échelle tracée à côté du tube ou sur le tube, exprimera précisément l'élasticité de l'air dans le récipient. Ce baromètre raccourci ne peut servir que pour les expériences dans lesquelles la raréfaction de l'air est assez considérable.

284. On peut maintenant se proposer de calculer suivant quelle proportion on épuise l'air dans la machine à deux corps de pompe. C'est un problème très facile à résoudre quand on connaît le rapport de la capacité du récipient, y compris celle des tuyaux de communication, à la capacité de l'un des corps de pompe. Je dis l'un des corps de pompe seulement, car les deux corps de pompe étant parfaitement égaux, et les pistons étant liés entre eux de telle manière que, lorsque l'un est au plus haut point dans son corps de pompe, l'autre est au plus bas point dans le sien, il est évident que le volume de la quantité d'air que fait sortir chaque tour de manivelle est égal à la capacité d'un des corps de pompe seulement (1)

(1) Soient donc F la capacité du récipient, P celle de chacun des corps de pompe; A la masse de l'air contenu dans ce récipient. Si, pour plus de simplicité, on suppose que l'un des pistons soit à son point le plus bas, et conséquemment l'autre à son point le plus haut, ce dernier piston viendra, par un tour de manivelle, à son point le plus bas; et, comme le volume de la quantité d'air était $F+P$, puisque ce piston avait au-dessous de lui un volume P d'air, le premier tour de manivelle aura fait sortir ce volume P; et par la proportion $A : x :: F+P : P$, on aura $x = \frac{AP}{F+P}$ pour la quantité d'air extraite, et par conséquent la quantité d'air qui restera sous le récipient sera égale à $A - \frac{AP}{F+P}$ ou bien $\frac{AF}{F+P}$. Le reste se trouverait aussi par la proportion $A : x :: F+P : F$. En faisant faire un second tour à la manivelle, l'autre piston en s'abaissant fera encore sortir un volume d'air égal à P, dont le poids x' calculé au moyen de la proportion $\frac{AF}{F+P} : x'' :: F+P :$

285. Les appareils que nous venons de décrire sont très souvent employés en physique.

C'est surtout avec les machines pneumatiques qu'on peut faire une infinité d'expériences instructives; veut-on, par exemple, démontrer la nécessité de l'air dans la respiration des animaux? on placera sous le récipient un oiseau ou un cochon d'Inde; si l'on fait jouer la machine, on verra ces animaux haleter et bientôt mourir.

Veut-on encore prouver l'existence de l'air dans l'eau et dans tous les liquides? qu'on place sous le récipient l'un quelconque de ces liquides, on verra, dès les premiers coups de piston, l'air se dégager sous formes de bulles.

On pourra s'assurer, par le moyen de la machine pneumatique, que la pression de l'atmosphère retarde l'ébullition des liquides, et que conséquemment cette ébullition doit avoir lieu à une température plus basse sur les montagnes élevées qu'à la surface de la terre. En effet, qu'on mette de l'eau tiède sous le récipient de la machine, on parviendra à la faire bouillir par un degré convenable de

P sera $x' = \frac{AFP}{(F+P)^2}$. Par un troisième coup de piston on enlèverait $\frac{AF^2P}{(F+P)^3}$....., et par m coups $\frac{AF^{m-1}P}{(F+P)^m}$. Le premier reste est $\frac{AF}{F+P}$; le second est $\frac{AF^2}{(F+P)^2}$; le troisième serait $\frac{AF^3}{(F+P)^3}$; et enfin le m^e $\frac{AF^m}{(F+P)^m}$.

Application. Le rapport entre la capacité d'un des deux corps de pompe d'une machine pneumatique, et un ballon dans lequel on veut faire le vide, est 5 : 12. Le ballon contient 5^{lit}, 35 d'air. On demande combien il restera d'air après huit coups de piston.

Voici le tableau des résultats après chaque coup de piston.

	Quantités extraites. litres.	Restes. litres.
1er coup de piston.	1,573	3,776
2e.	1,111	2,666
3e.	0,784	1,882
4e.	0,553	1,328
5e.	0,391	0,938
6e.	0,276	0,662
7e.	0,195	0,467
8e.	0,137	0,330

Il reste après huit coups de piston 0^{lit},330.

On a calculé successivement les résultats partiels afin de mettre sous les yeux du lecteur la progression décroissante des quantités extraites et des quantités restantes; mais on aurait pu calculer immédiatement le dernier reste.

Pour s'assurer de l'exactitude des calculs, on ajoute les quantités extraites au dernier reste; on doit retrouver la quantité d'air primitive.

raréfaction de l'air. Si on laisse entrer l'air extérieur, l'ébullition cesse à l'instant.

On conçoit, d'après cela, que si l'on remplace dans cette expérience l'eau par un mélange de ce liquide et d'une substance fixe, ce liquide pourra être chassé à une faible température. C'est ainsi qu'on obtient dans les laboratoires de chimie, à l'état de pureté, certaines substances que la chaleur ou l'air altère. On a même employé la machine pneumatique dans les travaux en grand, par exemple, dans la concentration du sirop, de la colle forte, etc.

Des Machines à Compression.

286. Les machines à compression sont absolument l'inverse des machines pneumatiques : celles-ci servent à raréfier l'air, celles-là au contraire sont destinées à le condenser. La machine à compression (*fig.* 173) la plus simple se compose d'un corps de pompe AC, dans lequel glisse à frottement un piston P entièrement massif. La partie inférieure de ce corps de pompe correspond à un petit conduit auquel se visse le récipient B dans lequel on veut condenser l'air. A l'entrée de ce conduit est une soupape S qui s'ouvre de haut en bas, et vers la partie supérieure du corps de pompe est pratiquée une petite ouverture t destinée à laisser entrer l'air extérieur. Par cette disposition on voit facilement que lorsque le piston P s'abaisse dans le corps de pompe, tout l'air qui se trouve au-dessous de lui, étant fortement comprimé, force la soupape S à s'ouvrir, et s'introduit ainsi dans le récipient B. Mais aussitôt qu'on élève le piston, il se forme un vide dans le corps de pompe, l'élasticité de l'air condensé du récipient force la soupape S à se fermer sur elle-même; par conséquent cet air ne peut nullement s'échapper. Quand le piston P est au-dessus de l'ouverture t, l'air extérieur se précipite dans le vide du corps de pompe, et le remplit complètement. Alors on abaisse de nouveau le piston, l'air contenu dans le corps de pompe s'introduit encore dans le récipient B, et ainsi de suite.

287. Les corps de pompe que l'on construit aujourd'hui pour servir à la condensation de l'air ne diffèrent du précédent qu'en ce que la soupape S est remplacée par une soupape mécanique, disposée de telle manière qu'elle s'ouvre de dehors en dedans, pour donner passage à tout ce qui tend à entrer dans le récipient B; mais elle se ferme aussitôt par l'action d'un petit ressort, et bouche le passage à tout ce qui tend à en sortir. L'ouverture pratiquée dans le corps de pompe lui-même est aussi remplacée par une soupape S' qui s'ouvre de l'extérieur à l'intérieur, afin de laisser entrer l'air, et qui se referme sur elle-même dès que l'air du corps de pompe a acquis un certain degré d'élasticité. Cette soupape se trouve dans le modèle (*fig.* 174).

Enfin, pour rendre le jeu de la machine plus

continu, on emploie deux corps de pompe qu'on lie ensemble, comme dans la machine pneumatique, au moyen d'une roue dentée; mais ici les deux corps de pompe ne rendent pas le même service que dans cette machine, car il est évident qu'il faut toujours un effort très considérable pour condenser l'air extérieur dans le récipient : pour diminuer l'effort on réduit, autant que possible, le diamètre des pistons.

Afin de prévenir tout accident, si le récipient venait à se briser par l'effet de la condensation de l'air, on l'entoure d'un fort grillage et on le fixe entre deux plans de cuivre, que l'on serre fortement par des écrous (*fig.* 176).

Il est visible, d'après la construction de la machine, qu'on introduit à chaque coup de piston la même quantité d'air.

Pour juger du degré de condensation de l'air, le moyen qui se présenterait naturellement serait de mettre en communication avec le récipient une cuvette *V* en partie remplie de mercure dans laquelle plongerait un tube *H K* ouvert par les deux bouts; ce tube, plongeant par sa base dans le mercure, et communiquant par sa partie supérieure avec l'atmosphère, indiquerait l'excès de la pression de l'air du récipient sur la pression extérieure. Avant de faire jouer la machine, l'air intérieur du récipient ayant la même force élastique que l'air extérieur, le niveau du mercure serait le même dans la cuvette que dans le tube, mais à mesure que l'on condenserait l'air, comme la force élastique en deviendrait de plus en plus grande, le mercure monterait aussi de plus en plus, et on reconnaîtrait, par exemple, que l'on a condensé la valeur d'une atmosphère, quand le mercure se serait élevé à 28 pouces, celle de deux atmosphères quand il serait à une hauteur de 56 pouces, et ainsi de suite.

Mais comme ce moyen exigerait un tube barométrique très long, on ne le met jamais en usage. On se sert d'un instrument qui se compose d'une cuvette pleine de mercure, dans laquelle plonge un tube d'une certaine grandeur fermé par son extrémité supérieure, et rempli d'air à la pression ordinaire (*fig.* 175); on visse cet appareil sur le tuyau *C D*, qui établit la communication entre les corps de pompe et le récipient de la machine, de manière que la cuvette soit seulement en communication avec le récipient. Avant qu'on fasse jouer la machine, l'air intérieur de cette éprouvette ayant la même force élastique que l'air du récipient, le niveau du mercure est le même dans le tube que dans la cuvette. Mais à mesure que l'on condense l'air, le mercure de la cuvette étant pressé par une force plus considérable, le niveau change, et il monte de plus en plus dans le tube. Au moyen de la différence des niveaux, on peut facilement estimer le degré de condensation (1).

(1) Soit h cette différence : la force élastique de l'air intérieur du récipient fait équilibre à l'air du tube, plus à la colonne h; si donc nous représentons par F la force élastique de l'air correspondante au volume primitif V, et V' le volume actuel, $\frac{VP}{V'}$ sera, d'après la loi de Mariotte, la force actuelle de l'air contenu dans l'éprouvette, et conséquemment $\frac{VP}{V'} + h$ représentera celle de l'air intérieur du récipient; mais on sait que les poids d'un même gaz pris sous le même volume sont proportionnels aux forces élastiques; si donc nous représentons par A le poids de l'air renfermé dans le récipient avant l'expérience, et par x le poids à la fin de l'expérience, la proportion

$$A : x :: P : \frac{VP}{V'} + h, \text{ nous donnera } x = \frac{A\left(\frac{VP}{V'} + h\right)}{P}$$

$$= A\left(\frac{VP + V'h}{V'P}\right),$$ ou bien, en d'autres termes, on a condensé l'air dans le rapport de 1 à $\frac{VP + V'h}{VP}$.

288. *Du Fusil à vent.* La partie principale de ce fusil est une crosse en fer à l'entrée de laquelle se trouve une soupape élastique, qui s'ouvre de dehors en dedans. Pour le charger, on visse à l'entrée de cette crosse un corps de pompe analogue à ceux des machines à compression; puis, lorsqu'on a condensé dans la crosse une assez grande quantité d'air, on ôte le corps de pompe, et l'on met à sa place un canon en fer long de 4 pieds environ, dans lequel on introduit une balle de son calibre, que l'on y bourre comme dans un fusil ordinaire.

Pour faire partir ce fusil, on tire simplement avec le doigt un petit ressort adapté à la crosse : ce ressort fait ouvrir la soupape, et, par ce moyen, une partie de l'air condensé qu'elle retenait dans la crosse s'échappe, et chasse par son ressort la balle à une grande distance. Comme la soupape se ferme presque aussitôt qu'elle est ouverte, il n'y a qu'une faible partie de l'air condensé qui s'échappe; en sorte qu'on peut tirer un certain nombre de coups avec ce fusil, sans être obligé de le charger de nouveau.

Lorsqu'il se trouve quelque matière dure dans la bourre, comme du sable, du bois, on aperçoit un dégagement de lumière à la bouche du canon.

289. *De la Fontaine de Compression.* Cette fontaine consiste en un vase de la forme *A B* (*fig.* 179), traversé en son milieu par un petit tuyau de cuivre entrant par l'ouverture *o*, qu'un robinet *R* ouvre et ferme à volonté; ce tuyau se visse sur l'ouverture et se prolonge jusqu'au fond. On verse de l'eau dans le vase, de manière à ne laisser vide que la partie supérieure *S*; pour cela on enlève le tuyau, qu'on remet en place aussitôt après. Ensuite on

visse en e un corps de pompe pareil à celui du fusil à vent, et après avoir ouvert le robinet de communication R, on fait jouer le piston. Il pénètre dans la fontaine une certaine quantité d'air qui ajoute son élasticité à celle de l'air de l'intérieur, de sorte qu'en donnant un nombre suffisant de coups de piston, on peut condenser dans la partie supérieure S une très grande quantité d'air. Cela fait, on ferme le robinet R, pour dévisser le corps de pompe, et l'on remplace ce dernier par un petit ajutage percé d'une ouverture étroite : si l'on ouvre le robinet R, l'air condensé au-dessus de l'eau, ayant une force de ressort supérieure à celle de l'air extérieur qui presse sur ce liquide par l'ouverture de l'ajutage, l'en fait sortir sous la forme d'un jet, qui s'élance d'abord à une assez grande hauteur, s'abaisse de plus en plus, à mesure que la force élastique de l'air intérieur diminue, et finit par disparaître tout-à-fait.

DES POMPES.

290. La théorie des pompes se trouve naturellement placée à côté de celle du baromètre et de tous les appareils dont les effets sont dépendans du poids ou de l'élasticité de l'air.

Il y a trois espèces de pompes : la pompe aspirante, la pompe foulante, et la pompe foulante et aspirante, ou pompe composée.

291. La *Pompe aspirante* se compose d'un canal AB (*fig.* 180), appelé corps de pompe, dont l'extrémité inférieure plonge dans l'eau, et dans lequel on fait monter ou descendre à volonté, au moyen d'une tige T, un piston P qui remplit exactement l'intérieur du corps de pompe. Ce piston est muni d'une soupape F qui s'ouvre de bas en haut; dans l'intérieur du corps de pompe, à une distance du niveau de l'eau moindre que 32 pieds, se trouve une seconde soupape F', qui s'ouvre dans le même sens. Quand on descend le piston P, la soupape F' se tient fermée par son propre poids; mais la soupape F étant soulevée par la force élastique de l'air compris entre le piston et la soupape F', cet air s'échappe. Quand on élève le piston P, il se forme un vide au-dessous de lui, la soupape F se ferme d'elle-même, tant par l'effet de son propre poids que par celui de la pression atmosphérique; la soupape F', au contraire, est soulevée par la force élastique de l'air compris entre elle et la surface de l'eau. Cet air se répand en partie dans l'espace vide que laisse le piston P au-dessous de lui, et, la force élastique diminuant nécessairement, la pression de l'atmosphère fait monter l'eau à une certaine hauteur dans la partie du corps de pompe située au-dessous de la soupape F'. Si l'on continue, on conçoit que ce jeu du piston fera bientôt monter l'eau au-dessus de la soupape F'. Le piston étant alors amené en contact avec cette soupape, le liquide ouvrira la soupape F, et pourra être transporté, par le piston, à telle hauteur qu'on voudra, et s'écouler par un tuyau latéral O.

Nous venons de dire que la soupape F' du corps de pompe ne doit pas être placée à plus de 32 pieds au-dessus du niveau de l'eau du réservoir; car au delà de cette limite, on aurait beau faire le vide dans la partie M, jamais l'eau ne monterait jusqu'à la soupape F'; et cela parce que le poids de l'atmosphère ne peut faire équilibre qu'à une colonne de 32 pieds d'eau.

Dans la pratique on place en général la soupape F' beaucoup au-dessous de cette hauteur.

292. La *Pompe foulante* se compose aussi d'un corps de pompe AB (*fig.* 181), dans lequel monte et descend à frottement un piston P. Mais ce piston est entièrement plein, et le tuyau FC par lequel s'écoule l'eau prend naissance à la partie inférieure du corps de pompe, et plonge même en partie dans le réservoir d'eau mn. A l'entrée de ce tuyau se trouve une soupape F qui s'ouvre de l'intérieur à l'extérieur du corps de pompe; celui-ci présente immédiatement au-dessous du tuyau latéral, une seconde soupape F', qui s'ouvre de bas en haut. Quand on abaisse le piston, la soupape F' se tient fermée, et la soupape F s'ouvre pour laisser sortir l'air qu'il condense; quand on le relève, la soupape F se ferme, et, comme l'eau tend toujours à se mettre de niveau, la soupape F' s'ouvre, et laisse passer une certaine quantité de liquide au-dessus d'elle, puis se referme. On abaisse de nouveau le piston, la soupape F s'ouvre pour laisser passer l'eau, laquelle vient dans le tuyau latéral à une certaine hauteur. On continue ainsi, et bientôt l'eau s'écoule par l'orifice O. La pression atmosphérique ne joue aucun rôle dans cette pompe, c'est-à-dire qu'elle marcherait dans le vide tandis que l'eau ne monte dans la pompe précédente qu'en vertu du poids de l'atmosphère.

293. La *Pompe composée*, ainsi appelée parce qu'elle réunit les effets des deux précédentes, ne diffère de la pompe foulante qu'en ce que la soupape F', et par conséquent le tuyau latéral, sont au-dessus du niveau de l'eau mn. Quand on abaisse le piston P (*fig.* 183), la soupape F' se tient fermée, et tout l'air qui est compris entre lui et cette soupape s'échappe par la soupape F. Quand on élève le piston, la soupape F se ferme, la soupape F' s'ouvre, et l'air qui est compris entre elle et le niveau de l'eau se répand en partie dans le vide formé au-dessous du piston. On voit donc qu'en faisant jouer suffisamment le piston P on parviendra bientôt à élever l'eau au-dessus de la soupape F'; de là on la refoulera dans le tuyau latéral au-dessus de la soupape F, et l'on pourra ainsi faire monter l'eau assez haut dans ce tuyau pour qu'elle s'écoule par l'orifice O. Il est inutile de dire que, pour qu'on puisse faire usage de cette pompe, il faut, comme dans la pompe aspirante, que la soupape F' soit au-dessus du niveau de l'eau, à une hauteur moindre que 32 pieds.

L'addition d'un réservoir d'air au tuyau latéral rend le jet continu. L'eau, par le jeu du piston, s'élève dans le réservoir *AR* (*fig.* 184), et commence d'abord à condenser l'air qui s'y trouve renfermé ; au bout de quelques coups de piston elle sort par le tuyau *S*; et comme l'air presse continuellement sur la surface *A C* du réservoir l'écoulement sera continu, tandis que dans la pompe précédente l'écoulement n'est produit que par l'abaissement du piston. La pratique apprend qu'il faut donner au réservoir à air une capacité égale à vingt-trois fois environ celle de la partie du corps de pompe parcourue par le piston. La pompe foulante, ainsi modifiée, peut servir avec avantage comme pompe à arroser les jardins, etc.

294. *Pompe des prêtres* (*fig.* 181 *bis*). Le piston est remplacé ici par un diaphragme en cuir fixé par sa circonférence au corps de pompe, et dont le centre est occupé par un disque métallique sur lequel est fixée la soupape. Quand on soulève la tige *T*, l'espace situé entre le diaphragme et la soupape *F* s'agrandit, et celle-ci s'ouvre; quand on la descend, la soupape se ferme, en sorte que le diaphragme produit le même effet que le piston avec moins de frottement.

295. On a proposé diverses pompes à deux pistons. La suivante (*fig.* 193), imaginée par M. Richard Franklin, nous paraît une des plus simples et des plus ingénieuses.

a b est le levier qui sert à mouvoir les deux pistons *P* et *P'* ; le point fixe du levier est en *c* ; *b d* la tige attachée au piston inférieur *P'* ; *h f* la tige attachée au piston supérieur *P*; deux roues *m* et *m'* roulant sur elles-mêmes, maintiennent les pistons verticaux. L'ascension du levier *a b* fait monter le piston inférieur et descendre le piston supérieur : les soupapes des pistons s'ouvrant de bas en haut, chaque piston en baissant laissera passer l'eau au-dessus de lui. On a indiqué par *A B* le corps de pompe, par *H* le conduit plongé dans la pièce d'eau, enfin par *K* le tuyau de décharge.

296. La *pompe à incendie* en usage en France se compose de deux corps de pompe, entre lesquels se trouve un réservoir à air *M* (*fig.* 168). Cette pompe est placée dans un réservoir qu'on remplit d'eau ; ce liquide est aspiré par la pompe et refoulé dans le réservoir, d'où il est poussé à l'aide d'un tuyau en cuir *C D* placé dans la direction voulue : des plaques en cuivre à jour empêchent le gravier de pénétrer dans les corps de pompe. Souvent ceux-ci sont disposés de manière à communiquer à volonté avec une pièce d'eau. Dans chaque corps de pompe et le conduit d'air existe une soupape qui permet le passage de l'eau de la pièce d'eau dans le corps de pompe, et de celui-ci dans le réservoir.

De la Fontaine intermittente.

297. Cette fontaine ingénieuse est peu employée dans les arts ; nous en parlons parce qu'elle offre une application du ressort et de la pesanteur de l'air. Le réservoir est ordinairement (*fig.* 190) un ballon de verre, traversé dans le sens de son axe vertical par un tube métallique *A B*, dont l'extrémité supérieure est à une certaine distance de la partie la plus élevée du ballon, et dont l'extrémité inférieure, qui porte une petite échancrure *E*, touche au fond d'une cuvette *C D*, percée en son centre d'un petit trou ; ce tube, tenu dans une situation verticale par un cylindre métallique *E F*, dans lequel il s'emboîte, et qui est fixé à la cuvette *C D* par différens supports, entre dans le ballon par une ouverture cylindrique, qu'il ferme exactement. Enfin, autour de ce tube, le ballon est percé de plusieurs trous auxquels sont adaptés autant de petits tubes métalliques *t*, *t'*. *t''*.

On remplit le ballon presque entièrement d'eau par une ouverture *o*, que l'on referme ensuite. L'air intérieur faisant équilibre à la pression extérieure, le liquide s'écoule d'abord, en vertu de son propre poids, par les orifices *t*, *t'*, *t''* : de là il tombe dans la cuvette *C D*, et se rend dans le récipient placé au-dessous d'elle, en passant par l'ouverture pratiquée au centre de cette cuvette ; mais, comme cette ouverture est telle, que dans un temps déterminé elle laisse couler moins d'eau que les tubes *t*, *t'*, *t'*, ensemble, il arrivera nécessairement un instant où l'échancrure *E* sera tout-à-fait obstruée par l'eau de la cuvette. Alors l'air extérieur ne pourra s'introduire dans le ballon.

Mais l'eau continuant toujours de s'écouler par les tuyaux *t*, *t'*, *t''*, l'espace qui est au-dessus, c'est-à-dire le volume de l'air qui la presse intérieurement, deviendra de plus en plus grand, et conséquemment la force élastique de ce fluide s'affaiblira de plus en plus. On voit qu'après un certain temps, cette force élastique, ajoutée à la colonne d'eau qui reste dans le ballon, sera contrebalancée par la pression extérieure ; alors l'écoulement cessera. Cependant l'eau s'écoulera de la cuvette *C D*; quand l'échancrure du tube *A B* sera libre, l'air extérieur s'introduira de nouveau dans le ballon ; l'écoulement recommencera donc, et continuera jusqu'à ce que l'échancrure soit de nouveau obstruée par l'eau, et ainsi de suite, jusqu'à la sortie complète de l'eau du ballon (1).

(1) La fontaine intermittente donne lieu à plusieurs problèmes : 1° Un cylindre fermé est rempli de mercure jusqu'à une certaine hauteur, et contient, dans sa partie supérieure, de l'air sec, à la pression extérieure *H*. On demande combien il s'écoulera de mercure si l'on pratique une ouverture à la base. Soient *A* la hauteur totale du cylindre, *B* la hauteur du mercure, *X* la hauteur du mercure écoulé. On aura $B - X + H\left(\frac{A-B}{A-B+X}\right) = H$. 2° Résoudre la même question en remplaçant le mercure par l'eau. Nous supposerons les mêmes données, et, de plus, nous admettrons qu'à la température de

De la Fontaine de Héron.

298. Cette fontaine (*fig.* 191) se compose de deux ballons tenus l'un au-dessus de l'autre par un cylindre intermédiaire. Dans ce cylindre est un tube métallique qui établit la communication entre les deux ballons, et qui se prolonge dans le ballon supérieur jusqu'à une certaine distance de sa partie la plus élevée. Au-dessus est une cuvette *A B*, traversée à son centre par un tube vertical *O C*, qui plonge presque jusqu'au fond du ballon supérieur, et qui s'amincit vers son ouverture supérieure *O*. Enfin, cette cuvette communique aussi au ballon inférieur par le moyen d'un tube latéral *H K*.

Quand on a rempli en partie d'eau le ballon supérieur, l'air intérieur pressant absolument de la même manière sur la surface du liquide que l'air extérieur auquel donne passage l'orifice *O*, on voit qu'elle est de niveau dans le tube *O C* et dans le ballon. Mais si par le tube *H K* on verse de l'eau dans le ballon inférieur, l'air de ce ballon monte en partie dans le ballon supérieur, augmente la force élastique de celui qui y est renfermé, et force l'eau à sortir par le tube *O C*, sous la forme d'un jet. Cette eau, à mesure qu'elle tombe dans le bassin *A B*, s'écoule dans le tube *H K* et se rend dans le ballon inférieur, ce qui entretient la force élastique de l'air intérieur des deux ballons; on voit d'ailleurs que le jet dure d'autant plus long-temps que la capacité du ballon inférieur est plus grande par rapport à celle de l'autre ballon. (*Voyez* plus loin l'application qu'on a faite de cette fontaine aux *Lampes hydrostatiques*.)

Du Siphon.

299. C'est à la pression de l'atmosphère que sont dus les effets du siphon. Cet instrument, qui sert à transvaser les liquides, consiste, en général, en un tube recourbé, à deux branches inégales, et dont la plus courte plonge dans le liquide qu'on veut transvaser (*fig.* 140). Soit *A B* un vase plein d'eau : on se propose de faire passer cette eau dans le flacon *N*; pour cela on plonge la branche la plus courte *H O* dans le vase *A B*, et l'on aspire par l'extrémité opposée *C* de manière à raréfier l'air de l'intérieur du tube; l'on remplit d'avance le tube de liquide et l'on porte la petite branche dans le vase *A B*, en ayant soin de tenir la plus grande branche fermée; supposons qu'on opère, en raréfiant l'air dans le tube, le liquide s'introduit à l'instant dans celui-ci et tombe par la plus grande branche : l'écoulement continue jusqu'à ce que le vase supérieur *A B* soit vide.

La théorie du siphon est facile. La pression atmosphérique s'exerce avec une égale intensité à l'extrémité de la plus longue branche et sur la surface du liquide, de sorte qu'avant la raréfaction de l'air, le niveau du liquide dans le tube est le même que dans le vase. Si, au contraire, l'air est raréfié par la succion, l'eau du vase étant pressée par le poids total de l'atmosphère, doit s'élever dans le tube et le remplir. Supposons le tube plein : il est visible que les points *O* et *E* étant également pressés par l'air extérieur, et les deux parties *H O* et *H E* du siphon se faisant équilibre, la partie *E K* doit tomber; et, comme elle est sans cesse remplacée par le liquide du vase supérieur, l'écoulement ne finira que lorsque tout le liquide sera passé dans le vase *N* (1).

Si l'appareil était placé dans le vide, le liquide retomberait dans chaque branche en vertu de la pesanteur.

300. Pour transverser les liquides corrosifs, on joint au tube principal *O C* un tube latéral *E F* (*fig.* 156), et c'est par ce dernier tube que se fait l'aspiration; on a encore soin de le renfler vers sa partie inférieure *E*, afin d'y accumuler le liquide, et quand il y est parvenu, on arrête la succion.

On peut encore remplacer le tube latéral par une petite pompe aspirante; il faut avoir l'attention dans l'un ou l'autre cas, de fermer la partie inférieure *m*.

Le siphon peut servir à vider une partie d'un

l'expérience, la force élastique de la vapeur d'eau soit *F*. Il est clair que l'écoulement s'arrêtera quand l'élasticité de l'air sec, diminuée par la dilatation, plus la force élastique de la vapeur qu'il renferme, plus la colonne d'eau, fera équilibre au poids de l'atmosphère. Or l'élasticité de l'air sec est $H-F$. L'agrandissement du volume se fait dans le rapport de $A-B$ à $A-B+X$; l'élasticité de l'air décroît dans le même rapport, et devient conséquemment $(H-F\frac{(A-B}{A-B+X}$. La force élastique de la vapeur est toujours F, puisqu'il y a assez d'eau pour saturer tout l'espace. Comme les diverses élasticités, ainsi que la pression extérieure sont exprimées par des hauteurs de mercure, il faut diviser la colonne d'eau restante par 13,586, densité du mercure. On aura donc l'équation

$$(H-F)\frac{(A-B)}{A-B+X}+F+\frac{B-X}{13,586}=H.$$

Dans chacune de ces équations, tout est connu, à l'exception de X; on aura donc facilement la valeur de cette inconnue.

(1) Il est aisé de donner l'expression générale du siphon.

Pour cela supposons-le placé dans un fluide *UVMN* d'une densité d, soit d' la densité du liquide dans le siphon *O*. Tout étant symétrique pour les points *O* et *E*, les colonnes *OH* et *HE* ainsi que les colonnes *OQ* et *E P* sont sans influence sur l'écoulement. C'est seulement la différence entre la pression $h\,d$ et $h\,d'$ qui le détermine, h étant égale à *E K*; dans le cas ordinaire d est toujours plus petit que d'', et conséquemment $hd < hd'$; le liquide *E K* doit tomber et entraîner celui du siphon; mais si l'appareil était enveloppé de mercure, ou si un siphon plein d'huile était plongé entièrement dans l'eau, on aurait $h\,d > h\,d'$, et le liquide remonterait dans le vase *AB*.

canal ou d'une rivière, comme cela a été pratiqué. Dans ce cas, on le formerait en planche, il serait fermé aux deux extrémités, et on le remplirait par la partie supérieure Quand il serait plein on fermerait l'ouverture supérieure et l'on rendrait libres les deux extrémités. On peut calculer quelle immense quantité d'eau on ferait écouler avec un siphon d'un mètre de diamètre.

301. La construction d'un petit appareil assez curieux, connu sous le nom de *vase de Tantale*, est fondée sur la théorie du siphon. Cet appareil consiste en un verre ordinaire, dans l'intérieur duquel est un tube recourbé $C\,O\,H$ (*fig.* 157) ; la plus courte branche $O\,C$ est contenue dans le verre, tandis que la plus longue sort par le pied sur lequel il est monté. Si l'on verse de l'eau dans le verre de manière à ne pas couvrir le sommet O du siphon, on n'observe rien de particulier ; mais, du moment que le niveau est au-dessus du sommet O, le liquide s'écoule par la plus longue branche, et l'on a beau en verser de nouveau, on ne parvient jamais à remplir le vase.

302. Il y a dans la nature des fontaines intermittentes dont le jeu est analogue à celui du siphon ou du vase de Tantale. Soit (*fig.* 158) une cavité *mno* produite dans la terre : lorsque les eaux l'auront remplie jusqu'au point le plus élevé K, la fontaine coulera jusqu'à ce que l'eau soit au-dessous de $m\,n\,p$; l'écoulement recommencera quand les pluies auront ramené l'eau à la même hauteur K.

Lampes hydrostatiques.

303. *Lampe de Girard.* Pour concevoir la construction de cette lampe, il faut d'abord remarquer que dans la fontaine de Héron la hauteur à laquelle s'élève le jet diminue de plus en plus. M. Girard est parvenu à rendre cette hauteur constante.

La *fig.* 172 fera bien concevoir cette lampe. Le réservoir d'huile A est placé au-dessus de deux réservoirs B et C remplis en partie d'eau ; la colonne liquide du réservoir intermédiaire, qui détermine le mouvement, a la même hauteur, pendant tout le temps que fonctionne la lampe, puisque ce réservoir communique avec l'air par un tube ouvert $a\,b$, et que nous savons (n° 64) que la colonne liquide doit être comptée du point a. Le tube $c\,d$, qui conduit l'eau du réservoir B dans le réservoir C, est enveloppé à la partie inférieure d'un cylindre $m\,n$ dont les bords supérieurs s'élèvent à une hauteur que n'atteint jamais le niveau du réservoir C. Il résulte de là que l'eau se répand sur les bords du cylindre $m\,n$, ce qui fait que la colonne liquide qui détermine le mouvement est constamment égale à $a\,d$. Pour rendre l'ascension de l'huile indépendante du niveau dans le réservoir A, on courbe le tube $k\,i\,k$, qui porte l'air du réservoir C dans le réservoir A, de manière que l'extrémité k soit au niveau de l'extrémité inférieure l du tube $l\,p$, dans lequel l'huile doit monter. Cette disposition montre que l'élasticité de l'air, dans le réservoir A, est plus faible que l'élasticité dans le réservoir C d'une quantité représentée par la hauteur $k\,i$, et que conséquemment l'huile ne s'élèvera qu'à une hauteur égale à $op = a\,d \times \frac{d}{d'} - k\,i$, d étant la densité de l'eau, d' celle de l'huile. Mais comme $k\,i$ est égal à $l\,o$, hauteur du niveau du vase A au-dessus de l'extrémité du tube $l\,p$, il est visible que l'huile se tiendra dans ce tube à une hauteur $l\,p$, comptée de l, égale à $a\,d\,\frac{d}{d}$. On peut s'arranger de manière que la mèche soit placée à l'extrémité supérieure du tube $l\,p$. Voilà l'explication de la construction de la lampe de Girard. Bien entendu que les dimensions des réservoirs sont proportionnées au temps pendant lequel la lampe doit marcher.

304. *La lampe à dissolution saline diffère totalement de la précédente.*

Dans cette lampe, une dissolution saline fait équilibre à la colonne d'huile. Soit A un réservoir (*fig.* 182) fermé et rempli en partie d'une dissolution de ce genre, soit B un réservoir rempli d'huile, soit enfin un tube $e\,f$ destiné à alimenter la mèche. Pour rendre constante la hauteur du liquide au-dessus du réservoir B, on adapte au réservoir A un tube $a\,b$ ouvert par ses deux bouts et plongeant dans l'atmosphère par sa partie supérieure. En sorte que la colonne qui détermine le mouvement est égale à $a\,g$. Nous faisons abstraction de la variation du niveau de la dissolution saline dans le réservoir B, parce que ce dernier est très large. On peut d'ailleurs calculer la diminution de la hauteur de la colonne d'huile : en effet, soit h l'élévation du niveau de la dissolution saline dans le réservoir B ; soient d la densité de cette dissolution, et d' celle de l'huile ; $h\,\frac{d}{d'}$ sera la hauteur d'huile correspondante à h ; mais comme l'huile s'est élevée de h dans le réservoir B, il s'ensuit que l'abaissement réel de l'extrémité de la colonne d'huile ne sera que $h\,\frac{d}{d'} - h$ ou $h\left(\frac{d-d'}{d'}\right)$ dont la valeur sera d'autant plus petite que d différera moins de d'.

Dans la lampe de M. Thylorier, qui est très répandue, la densité de la dissolution est à celle de l'huile comme 157 à 100. Cette dissolution est faite avec du sulfate de zinc dissous dans son poids d'eau.

MACHINES A VAPEUR.

305. Ces machines sont devenues, depuis un petit nombre d'années, d'une application si générale dans les arts, que l'histoire doit en trouver place même dans les ouvrages élémentaires.

Le jeu de ces machines est fondé sur le développement de la force élastique de la vapeur d'eau par la chaleur.

La force motrice de la vapeur remplace généralement, avec une supériorité incontestable, la force de l'homme, des animaux, de l'eau et du vent. L'emploi de cette force a produit une révolution dans toutes les parties de l'industrie.

Les anciennes machines étaient à simple effet; dans ces machines la vapeur n'agissait que sur une des deux faces du piston. Presque toutes les machines employées aujourd'hui sont à double effet; la vapeur agit alternativement sur les deux faces du piston (*Voyez* le n° 308.) On les distingue en machines à *basse*, à *moyenne* et à *haute pression*. Dans les premières l'élasticité de la vapeur est comprise entre une et deux, dans les secondes entre deux et trois atmosphères; dans les dernières elle est supérieure à trois atmosphères. Les machines à basse ou à moyenne pression sont avec *condensation*, c'est-à-dire que la vapeur y est condensée par de l'eau froide à la sortie des cylindres, tandis que les machines à haute pression sont quelquefois employées sans condensation; la vapeur passe alors immédiatement dans l'atmosphère après avoir produit son effet sur le piston.

Enfin on appelle machines à *moyenne* ou à *haute pression* avec *détente*, celles dans lesquelles on met à profit la détente ou le débandement de la vapeur; ces machines sont à un seul ou à deux cylindres. Dans les premières, la détente s'opère pendant une partie de la course du piston; dans les dernières, elle s'opère dans le plus grand cylindre, qui est destiné à cet effet et sans que la communication avec la chaudière soit alors interrompue comme dans les premières.

Nous nous bornerons à parler avec quelques détails des trois principales machines, 1° de Watt, 2° de Wolf, 3° de Trevithick. Néanmoins, afin de faire voir de quel point on est parti et comment on est parvenu à construire les machines actuellement employées, nous donnerons une description succincte de la machine de Newcommen. Ce que nous dirons de ces machines suffira pour faire comprendre toutes les autres.

Machine de Newcommen et de Cawley (*à simple effet*).

306. Pour donner d'abord une idée de l'emploi de la vapeur comme force motrice, nous supposerons qu'on veuille faire jouer le piston d'une des pompes que nous venons de décrire, n° 289. Soit P ce piston qu'il s'agit de faire monter et descendre dans le corps de pompe AB (*fig.* 186). A cet effet, on attache la tige du piston à une chaîne qui s'enroule sur une des extrémités d'un levier arqué CD $C'D'$, mobile autour du centre O. Si une chaîne est semblablement disposée à l'autre extrémité, il est visible qu'en la tirant de haut en bas on fera monter le piston P. Supposons maintenant que le piston P' soit assez pesant pour qu'abandonné à lui-même il parvienne au fond du corps de pompe; si l'on tire de nouveau la chaîne $C'D'P'$, on fera monter le piston, et ainsi de suite.

On fera monter et descendre le piston par le moyen de la vapeur seule, en plaçant une chaudière sous le corps de pompe $A'B'$. La température de la vapeur sera plus ou moins supérieure à 100 degrés; elle peut être introduite à volonté dans le corps de pompe par le moyen d'un robinet R qui sert à établir la communication entre la chaudière et le corps de pompe. Un petit canal latéral $t\,h$, s'ouvrant de dedans en dehors est destiné à donner issue à l'air qui se trouve sous le piston. Supposons celui-ci parvenu au plus bas point de sa course, il ne laissera au-dessous de lui qu'un petit espace rempli d'air; si l'on ouvre le robinet R, la vapeur se précipitera dans le corps de pompe sous la base du piston, chassera l'air par le tuyau $t\,h$, se dégagera aussi en partie par la même soupape, et, par sa force de ressort, fera monter le piston P'. Bientôt le contrepoids W fera descendre P et monter P'. Lorsque ce dernier piston est arrivé au plus haut point de sa course, l'ouvrier ferme le robinet R, et en même

temps introduit par le tuyau latéral *v s* un courant d'eau froide qui condense la vapeur; l'eau provenant de cette condensation, ainsi que l'eau d'injection, s'écoule par le tuyau *o s*; et comme l'air de la partie inférieure du corps de pompe a été expulsé, il se produit un vide à peu près complet. La *pression atmosphérique* agit sur la base supérieure du piston *P'*, le fait descendre et en même temps fait monter le piston *P*.

Le tuyau par lequel s'écoule l'eau du puits est marqué par *K*; celui par lequel le réservoir *A* est entretenu plein est désigné par *K'*.

La vapeur ne sert pour ainsi dire qu'à faire le vide sous le piston *P'*. Celui-ci descend pressé par le poids de l'atmosphère et entraîne le piston principal *P* dans un mouvement contraire. C'est pourquoi on appelle cette machine *machine atmosphérique*.

L'eau a toujours au moins 100 degrés au moment où la vapeur se précipite sous le piston; la température et l'élasticité s'en augmentent pendant que le robinet *R* est fermé. Pour éviter que la chaudière ne crève, on adapte au haut de celle-ci une soupape *H* qui s'ouvre de dedans en dehors avec un effort connu et déterminé. Tant que la vapeur n'a qu'une force élastique égale à la pression extérieure, ou plus faible, la soupape reste fermée; mais si elle devient égale à la pression de l'atmosphère, plus à la résistance de la soupape, celle-ci s'ouvre, la vapeur se dégage, et il n'y a point d'explosion à craindre. Mais comme la soupape pourrait bien ne pas céder au moment opportun, il est bon de donner de la solidité aux chaudières.

307. Cette machine présente plusieurs inconvéniens graves; elle occasione une perte considérable de vapeur, puisque le piston et le cylindre étant refroidis à chaque injection d'eau froide, la vapeur, au moment de son entrée dans le cylindre, se condense en partie. Un second défaut, c'est la nécessité d'un ouvrier pour fermer et ouvrir à propos le robinet d'injection et le robinet de la chaudière à vapeur, car dans une bonne machine l'action du premier moteur doit mettre toutes les parties en mouvement sans aucun secours étranger. Dans la machine de Newcommen, qu'on trouve dans quelques exploitations, les robinets sont ouverts et fermés par la machine même. On rapporte qu'un enfant, chargé du soin d'ouvrir et de fermer les robinets, imagina un mécanisme qui le dispensa de ce travail.

Cette machine quoique très imparfaite, est supérieure à ce qu'on avait imaginé d'abord. C'est la machine de Savery perfectionnée par Newcommen et Cawley.

Machine de Watt (basse pression).

308. Watt, constructeur d'instrumens à Glascow, frappé de la destruction de la quantité énorme de vapeur qu'occasionait l'injection d'eau froide dans le cylindre même, chercha les moyens d'opérer cette injection dans un vase séparé. Il appela ce vase *condenseur*. Nous savons que si le condenseur est vide d'air et en communication avec le cylindre au moment de l'injection d'eau froide, la vapeur s'y précipitera complètement. Il ne s'agit plus que d'enlever l'eau et l'air du condenseur, afin d'entretenir celui-ci constamment vide. Une pompe aspirante, fixée à la machine, est chargée de ce soin. Dans ces premières machines, la forme du condenseur ne permettant pas l'extraction complète de l'air, on était obligé, à la reprise du travail, de laisser échapper de la vapeur qui chassait l'air à travers un tube appelé *reniflar*. Dans la machine de Newcommen, la libre admission de l'air sur la surface du piston était nécessaire, et même, afin d'empêcher le passage de la vapeur entre le cylindre et le piston, on couvrait celui-ci d'une couche d'eau froide, qui dans le mouvement du piston mouillait et refroidissait le cylindre. La machine de Newcommen ainsi perfectionnée était *à simple effet*: mais Watt conçut bientôt l'idée hardie de supprimer tout-à-fait la pression atmosphérique, et de ne faire dépendre le mouvement du piston que de la seule force de la vapeur, en mettant successivement cette vapeur en communication avec l'une et l'autre face du piston, et en faisant au même instant le vide sur la face opposée. Il employa une vapeur d'une élasticité égale ou un peu supérieure à la pression atmosphérique, et, pour empêcher l'accès de l'air, il ferma le cylindre par un couvercle appliqué solidement. La tige du piston entre à frottement dans le milieu de ce couvercle. Ainsi, dans la machine de Watt, il y a économie de temps et de combustible, puisque chaque course du piston est efficace et qu'il n'y a pas de vapeur employée inutilement à maintenir le cylindre et le piston à un degré de chaleur élevé. Il paraît que l'économie va jusqu'aux trois quarts de vapeur exigée par la machine de Newcommen. Aussi Watt fit une très grande fortune, et acquit à son pays des avantages immenses sur les nations rivales. L'Angleterre reconnaissante vient de lui élever une statue.

On voit dans la *fig.* 194 une coupe verticale de la machine de Watt, perfectionnée et telle qu'elle est employée aujourd'hui.

La vapeur passe de la chaudière dans l'intervalle laissé entre le cylindre *A A'* et l'enveloppe *C B*. Par le mécanisme d'une soupape à tiroir (*voy.* plus loin), elle vient alternativement au-dessus et au-dessous du piston *P*. La tige *T'* du piston est maintenue verticale par le moyen d'un parallélogramme *L K*. Le mouvement du piston se transmet au balancier *I H*; à ce balancier est fixée une bielle *M N*, qui fait tourner un arbre de couche *R*, dont le mouvement est régularisé par le moyen d'un volant. Ce mouvement rectiligne du piston s'est ainsi changé en un mouvement de rotation. Le régulateur est en *J*. (*Voyez* plus loin, *Régulateur*.)

Pour faire monter et descendre alternativement

le tiroir *E*, on a placé un excentrique sur l'axe du volant. Le collier métallique dans lequel se meut cet excentrique est fixé à un triangle *s u e*. Le sommet de ce triangle est boulonné avec un levier coudé *s q r*. *q* représente l'axe fixe autour duquel tourne le levier. L'excentrique fait avancer et reculer l'extrémité *u* du triangle *s u e*, et imprime au levier un mouvement de va et vient.

L'extrémité *r* de ce levier fait monter et descendre la tige *E*. Le même levier fait fermer et ouvrir la soupape du condenseur; de cette manière, à chaque précipitation de la vapeur dans le condenseur *O*, il s'y fait une injection d'eau froide. La pompe à air *t' p'* enlève l'eau du condenseur, et la porte dans un réservoir *a a'*, d'où, par le moyen de la pompe alimentaire *t p*, une partie passe dans la chaudière, et l'autre partie s'écoule au dehors. En *f* est un clapet qui permet le dégagement de l'air de l'eau de condensation. *K* le réservoir d'eau froide, entretenu plein par la pompe *t'' p''*, communique avec un puits ou avec une source quelconque d'eau froide.

Enfin des ouvertures placées à des hauteurs convenables empêchent que les réservoirs *a a'* et *b b'* ne soient jamais complètement remplis de liquide.

Machine de Woolf (à moyenne pression et à détente).

309. Il existe des machines à deux cylindres dont l'invention date de 1781. A cette époque, Hornlower prit un brevet d'invention pour une machine à deux cylindres, agissant à une atmosphère. M. Woolf a employé depuis de semblables machines à la pression de deux à trois atmosphères (1).

Dans ces sortes de machines la vapeur de la chaudière a une température supérieure à 100 degrés; les deux cylindres ont une même hauteur, et des bases proportionnelles à l'expansion qu'on veut donner à la vapeur. Par exemple, la force élastique de la vapeur dans la chaudière ou dans le petit cylindre, étant de trois atmosphères, le grand cylindre aura une base d'une dimension trois fois plus grande que celle du petit, si l'on veut détendre jusqu'à une atmosphère environ; mais il y a avantage à porter la détente jusqu'à une demi-atmosphère. La température du condenseur étant de 40°, la perte en pression, malgré la détente, se trouve encore de 0,07 d'atmosphère. Jusqu'à quel point est-il possible d'affaiblir cette perte par une plus grande expansion de la vapeur? C'est ce que la pratique peut seule apprendre.

Les deux pistons sont attachés à l'extrémité du même balancier, de sorte qu'ils s'élèvent et s'abaissent en même temps. La vapeur entre d'abord dans le petit cylindre, puis elle passe du haut de ce cylindre dans le bas du grand cylindre, et, au contraire, du bas du petit au haut du grand (*fig.* 195). La vapeur ne se précipite dans le condenseur qu'après avoir agi sur le petit et sur le grand piston. Pour maintenir la température des deux cylindres toujours à peu près au même degré, M. Woolf les enveloppe d'un troisième cylindre en fonte; deux tuyaux venant de la chaudière communiquent, l'un à la partie supérieure de l'enveloppe, l'autre à la partie inférieure. C'est de cette enveloppe que la vapeur passe dans le petit cylindre. On a proposé d'échauffer cette enveloppe par un foyer particulier; mais ce projet a été abandonné.

310. Les machines à deux cylindres ont reçu diverses modifications. Nous joindrons ici la description de la machine que M. H. Edwards a importée en France.

Elle est vue de face dans la figure 189.

A A, plaque de fonte sur laquelle la machine est assise.

B B est le niveau du sol. Afin de mettre à nu les diverses parties de la machine, on a supposé ici enlevés tous les massifs de maçonnerie établis en *A A* et en *B B*.

C C, balancier formé d'une seule pièce de fonte, supporté par un appui *a a* qui varie de forme selon la force de la machine et les localités.

D D, volant en fonte, composé de six segmens assemblés par des boulons.

E, tuyau qui conduit la vapeur de la chaudière à l'enveloppe des deux cylindres.

F F, bielle qui transmet le mouvement à la manivelle du volant.

H H, parallélogramme de la tige du piston.

I, condenseur formé par le fond du cylindre de la pompe à air.

K L, tuyau qui conduit la vapeur du grand cylindre au condenseur.

M, petite pompe alimentaire qui puise une portion de l'eau du condenseur pour la porter dans la chaudière. L'excès de l'eau de condensation est versé au dehors par la pompe à air; cet excès peut être utilisé pour des bains, etc. Un robinet *r* est destiné à régler la quantité d'eau chaude qui doit entrer dans la chaudière. Cette eau y est portée par le tuyau *r q*.

P, modérateur à force centrifuge.

Q R, levier qui communique du modérateur à la tige du robinet d'introduction de la vapeur.

Un robinet règle la quantité d'eau froide introduite de la bache dans le condenseur.

On n'a pas figuré de pompe à eau froide. Elle est analogue à celle de la machine précédente.

Depuis plusieurs années M. Edwards a introduit différentes améliorations de détails qu'il est impossible de faire connaître dans un ouvrage élémentaire.

Machines à haute pression.

311. Il existe aussi des machines à haute pres-

(1) MM. Steel et Aitkin ont modifié le système de Woolf en proposant trois cylindres au lieu de deux.

sion, dans lesquelles la vapeur a une élasticité de huit et même de dix atmosphères. Ces machines ont pour caractère d'agir sans condensation de la vapeur. MM. Olivier Evans et Trevithick en ont établi un grand nombre en Amérique. Elles ont été employées avec succès dans les mines du Pérou. Elles sont surtout avantageuses pour les machines locomotives (chariots à vapeur) : les chaudières de ces sortes de machines doivent être très solides; la vapeur passant dans l'atmosphère à une température élevée, la perte de force est considérable; cette perte pourrait être diminuée par l'emploi de la détente.

On n'emploie guère que des pressions de quatre à cinq atmosphères, dans les machines à haute pression sans condensation, attendu que des pressions plus élevées entraînent plus de réparations, causent toujours une perte considérable de vapeur, et enfin offrent plus de danger.

---

312. Après avoir fait connaître les machines à vapeur les plus importantes, il est utile de donner quelques détails sur les principales parties de ces machines.

313. *Modérateur.* La *fig.* 192 représente cette partie importante d'une machine à vapeur. Le modérateur sert, comme nous l'avons dit, à régler l'ouverture de la soupape d'introduction de la vapeur.

Le piston principal communique à la tige *a b* un mouvement de rotation; une bride *c d*, fixée sur la tige *a b*, percée en *c* et en *d*, reçoit les leviers *l p* et *q k*; la couronne *m n* porte un cylindre creux, glissant à frottement, et pouvant soulever le levier *r v*, auquel est fixé le robinet d'introduction. Si le mouvement de rotation de l'axe *b* s'accélère, la force centrifuge éloigne les masses *k* et *p*, la couronne *m n* s'abaisse, et par suite le robinet tourne de manière à laisser entrer moins de vapeur. Une diminution dans la vitesse du mouvement de l'axe *a b* produit un effet contraire.

314. *Piston.* Le piston le plus communément employé se voit dans la *fig.* 187. Il consiste en deux plaques *m n* et *e q*, fixées l'une à l'autre à l'aide de vis; l'intervalle *A B* des plaques est rempli avec de la filasse imprégnée de suif; à mesure que la filasse est usée, on rapproche les plaques. Ce piston convient dans les machines à basse pression; pour les machines à haute pression, dans lesquelles la filasse est rapidement usée, on l'a remplacé avec avantage par un piston métallique.

La *fig.* 188 donne une section d'un des pistons métalliques les plus avantageux. Ce piston est composé de six pièces de cuivre; trois pièces *A*, *B* et *C* sont des segmens; entre les segmens sont des coins *a*, *b* et *c*; des ressorts serrent les coins et les segmens contre le corps de pompe; à mesure que les segmens s'usent, les coins, poussés par les ressorts, entrent plus avant, et rendent toujours le piston parfaitement cylindrique. Des pistons de ce genre peuvent servir pendant plusieurs années sans réparations.

Une condition importante à remplir, et sans laquelle la destruction de la machine serait prompte, est de rendre le mouvement du piston rectiligne. On remplit cette condition approximativement à l'aide des moyens suivans :

Dans les anciennes machines, on adapte à la tige du piston une chaîne de Vaucanson qui s'enroule sur l'extrémité du balancier, comme on le voit dans la machine de Newcommen (*fig.* 186). Dans les machines à double effet, où la tige du piston est poussée avec la même force dans son ascension et dans sa descente, un autre mode de conserver le mouvement rectiligne devenait nécessaire; on l'a obtenu par le parallélogramme. Les *fig.* 189 et 194 en présentent un modèle.

La *fig.* 202 représente un mode plus simple et employé avec succès dans les machines peu considérables. Une bielle attachée à l'extrémité du balancier porte deux galets, un de chaque côté, qui pressent sur les montans *A A*, et maintiennent le piston dans une direction verticale.

315. *Soupapes pour le passage de la vapeur.* La *fig.* 196 fera concevoir le jeu des soupapes, à l'aide desquelles la vapeur passe de la chaudière dans le cylindre, et de celui-ci dans le condenseur.

On désigne par *A* le tuyau qui conduit la vapeur de la chaudière sous le piston, par *B C* le tuyau aboutissant au condenseur *D*, par *m n* et *p q*, deux boîtes partagées chacune en trois compartimens, dans lesquels sont les soupapes *a*, *b*, *c*, *f*, s'ouvrant par le haut; chaque boîte communique avec le fond et le haut du cylindre. Dans le compartiment du milieu de chaque boîte, est une communication en *k* et en *l*, qui répond au haut et au bas du cylindre. La vapeur arrive par le tuyau *A* dans la chambre supérieure de la boîte *m n*, et passe par le tuyau *E* dans la chambre supérieure de la boîte d'en bas.

La soupape *a* étant ouverte, le dessous du piston sera en communication par l'ouverture *l* et le tuyau *B C*, avec le condenseur *D*, dans le même moment, la soupape *b* étant ouverte, la vapeur passera du centre de la boîte d'en haut, au-dessus du piston, par l'ouverture *k*. Si les soupapes *a* et *b* sont fermées, et que les soupapes *f* et *c* soient ouvertes, la vapeur de la chaudière arrivera au-dessous du piston par l'ouverture *l*, en sorte que pendant que la vapeur de la partie supérieure du cylindre est en communication avec la chaudière, la partie inférieure communique avec le condenseur.

On a imaginé diverses autres soupapes. Nous citerons particulièrement les soupapes à *coulisse* ou à *tiroir*; ces dernières présentent l'avantage important de se conserver beaucoup plus long-temps : le frottement qu'elles éprouvent ne les rend que

plus propres à remplir leur objet; elles sont généralement employées dans les nouvelles machines. On en voit un dessin dans la *fig.* 197.

La vapeur arrive par le tuyau *T* dans *A B C D*, caisse qui en renferme une seconde *E F*. Cette dernière glisse à frottement contre *A I D*, par le moyen d'une tige verticale *H K*, qui traverse en *K* une boîte imperméable à la vapeur. Trois conduits *P S*, *P' S'* et *R V*, partent de la boîte *A B C D*. Le premier communique avec la partie supérieure du cylindre; le second avec la partie inférieure, et le troisième avec le condenseur. La vapeur de la chaudière se rend au-dessus du piston par *P S*, et la vapeur du dessous du piston passe dans le condenseur par les tuyaux *V R* et *P' S'*. Si la boîte *E F* monte, la vapeur de la chaudière communiquera par *P' S'* avec le dessus du piston, etc.

316. *Soupapes de sûreté.* Les soupapes de sûreté consistent en général en une plaque métallique, s'appliquant exactement sur l'ouverture rodée d'une tubulure de la chaudière (*fig.* 204) : l'invention en est attribuée à Papin. Elles sont destinées à laisser échapper la vapeur aussitôt qu'elle aura une élasticité qu'on ne veut pas dépasser. Si le poids était appliqué immédiatement sur la plaque, il faudrait 1 kil. par centimètre carré; mais comme il est fixé à l'extrémité d'un levier *c d f*, il peut être diminué. Chaque chaudière a une épaisseur déterminée pour une pression donnée; on augmente cette épaisseur à mesure qu'on veut opérer à une pression plus élevée. Les ouvriers chargent souvent imprudemment les soupapes; l'autorité, sur un rapport de l'Académie, a arrêté que chaque chaudière aurait deux soupapes, dont une serait sous clef; enfin dans la crainte que ces soupapes, privées par un long usage d'une partie de leur mobilité, ne jouassent pas au moment opportun, il a été ordonné que chaque chaudière présenterait encore deux rondelles d'alliage, de grandeurs inégales, fusibles, la plus petite à 10° et la plus grande à 20° au-dessus de la limite. On sait que l'étain, le bismuth et le plomb forment par leur combinaison un alliage fusible à 100 degrés, à 110, etc., selon les proportions. Pour empêcher que cette espèce de soupape ne cède long-temps avant d'avoir acquis la température de la fusion, on la couvre d'un réseau métallique à mailles serrées.

L'inconvénient réel que présentent les plaques fusibles, est d'être détruites toutes les fois qu'elles laissent échapper la vapeur.

On a proposé aussi de faire usage de lames minces qui céderaient sous une pression déterminée.

L'expérience a prouvé que la soupape cède toujours avant que le manomètre ait atteint le degré de pression marqué par le poids supporté par la plaque de la soupape.

M. Garnier a proposé de diminuer le bord reposant sur l'ouverture de la chaudière.

La plus sûre des soupapes serait peut-être un tube plein de mercure, adapté à la chaudière, semblable aux tubes à boules des appareils de chimie (*fig.* 198). M. Edwards a fait des essais sur ce sujet.

Enfin il nous semblerait encore plus facile de faire plonger dans un bain de mercure un tube recourbé de la forme *fig.* 199 : ce tube présenterait un espace *A B* assez considérable pour recevoir tout le mercure dans le cas d'absorption. On trouverait facilement un endroit pour le placer à côté de la chaudière. Ce moyen est applicable aux machines dont la pression ne dépasse pas trois à quatre atmosphères, c'est-à-dire à presque toutes les machines à vapeur employées.

317. *Soupapes intérieures.* Ces soupapes s'ouvrent du dehors en dedans et sont destinées à donner accès à l'air extérieur, dans le cas où il s'opérerait un vide dans la chaudière, par suite de la condensation subite d'une partie de la vapeur. L'emploi de ces soupapes est donc propre à empêcher l'écrasement des chaudières.

318. *Chaudières.* Les chaudières sont en cuivre, en tôle ou en fonte.

Dans les anciennes machines elles présentent une forme presque sphérique au dehors, et un plan dans la partie en contact avec le foyer. Depuis plusieurs années elles ont été singulièrement modifiées et perfectionnées.

Dans les machines à moyenne et à haute pression, la chaudière consiste en deux tuyaux de fonte cylindriques appelés *Bouilleurs*, placés horizontalement à côté l'un de l'autre, et au-dessous d'un cylindre d'une capacité plus grande (*fig.* 186). Au centre du cylindre supérieur, ou réservoir de vapeur, est une ouverture *m* assez grande pour permettre à un ouvrier d'en examiner, au besoin, l'intérieur. Plusieurs autres ouvertures plus petites sont pratiquées pour les soupapes de sûreté, les rondelles fusibles, et l'introduction de l'eau chaude.

Ces chaudières sont assez employées aujourd'hui. Ajoutons que la flamme, après avoir chauffé les bouilleurs, passe autour de la majeure partie du grand cylindre.

Dans d'autres systèmes, on a multiplié les bouilleurs. Les petits tubes sont surtout nécessaires dans les machines à haute pression, parce que la résistance de ces tubes est en raison inverse de leurs diamètres.

Il y a des chaudières formées de deux cylindres concentriques; la flamme du foyer passe dans l'axe commun; ces chaudières sont appelées *à foyer intérieur*.

La *fig.* 200 représente une chaudière d'une machine à basse pression avec tous les accessoires.

319. *Manomètre.* Le manomètre des machines à vapeur est un tube de Mariotte en communication avec la chaudière, et scellé dans un mur voisin (*fig.* 201). Ce tube se salit et est hors de service au bout de quelque temps; mais il présente un autre inconvénient plus grand, c'est qu'il ne donne qu'inexactement la pression de l'intérieur de la chaudière, parce que, le tube de verre étant im-

galement pressé au dehors et en dedans, cède et augmente de capacité. Il nous semble qu'il serait utile de remplacer cette éprouvette par un tube ouvert (*fig*, 207), pour les machines à moyenne et à basse pression : la hauteur du mercure dans le tube ouvert, augmentée de la hauteur du baromètre à l'extérieur, représenterait la pression de l'intérieur de la chaudière. Pour les machines locomotives à haute pression, ne serait-il pas convenable de faire usage d'une éprouvette (*fig*. 208) dans laquelle le tube gradué, étant également pressé en dedans et au dehors, indiquerait exactement l'élasticité de l'air ?

320. *Du Volant*. Fitz-Gerard s'est servi le premier du volant pour régulariser le mouvement des machines à vapeur. Sans le volant, ces machines ne pourraient guère servir qu'à élever l'eau d'un puits, les pierres d'une carrière, etc.

Le volant n'augmente pas la force effective de la machine, et même il la diminue d'une quantité dépendante du frottement de son axe, et de la résistance qu'éprouve son mouvement dans le milieu environnant; mais il est propre à régulariser la vitesse de l'arbre de couche.

Le volant le plus généralement employé aujourd'hui est celui qu'indique la *fig*. 194.

On trouve encore aussi quelques machines où il a la forme représentée dans la *fig*. 205.

Quelles sont les dimensions à donner au volant dans les différentes machines? C'est une question qui sort du plan que nous nous sommes tracé. (*Voyez* les Additions à l'ouvrage de Bélidor, où M. Navier a traité cette question à fond.)

Avantages comparatifs des diverses Machines.

321. Quels sont les avantages des diverses machines à vapeur ? Ces machines, comme nous l'avons déjà dit, sont de trois espèces, c'est-à-dire à basse, à moyenne et à haute pression.

La consommation en combustible et les frais d'entretien des machines, eu égard à leur travail utile, sont les deux élémens dont on tient particulièrement compte pour accorder la préférence à une espèce de machine plutôt qu'à une autre. La consommation en combustibles est moindre avec la machine à haute pression et à condensation qu'avec la machine à basse pression, et les frais d'entretien plus considérables. Le rapport de ces deux élémens dépend des localités.

On emploie beaucoup de machines à un seul cylindre et à détentes dans les mines profondes, comme celles de Cornouailles. Ces machines sont à simple effet, puisqu'on n'introduit de la vapeur sur le piston que lorsqu'il descend et pendant une partie de la course. Lorsqu'il remonte, la partie supérieure et la partie inférieure communiquent ensemble; mais aucune d'elles ne communique ni avec la chaudière ni avec le condenseur. Le piston ne remonte que par la réaction du poids des pompes qu'il a soulevées.

322. Les machines à vapeur des différens systèmes exigent pour leur service des quantités d'eau plus ou moins grandes.

La quantité d'eau que les machines à vapeur exigent pour leur service est *d'autant plus grande* qu'elles sont *plus puissantes ;* elle est dans tous les cas assez considérable pour qu'on ne puisse pas la *transporter* sur place, comme on le fait pour le combustible. En conséquence, il peut arriver qu'il y ait assez souvent impossibilité d'employer ces machines dans les lieux qui seraient cependant les plus convenables pour des exploitations, etc., surtout lorsque celles-ci exigent des machines d'une grande force.

M. Madelaine, capitaine d'artillerie, est parvenu à faire servir de nouveau l'eau de condensation en la refroidissant; il a pu ainsi alimenter sans difficulté une machine de la force de six chevaux avec 1/10 seulement de la quantité d'eau qui aurait été nécessaire. D'après M. Madelaine, *un dixième* représente même une limite qu'on n'atteindrait pas pour des machines de plus en plus puissantes. Nous sommes obligés de renvoyer pour la description du moyen employé, au mémoire inséré dans le *Bulletin de la Société d'Encouragement*, du mois de juin 1827.

323. On compare ordinairement la force d'une machine à vapeur à la force d'un cheval. La force attribuée à un cheval n'est pas la même dans tous les pays. M. Navier, en combinant les résultats les plus dignes de confiance, a trouvé qu'on pourrait représenter la puissance mécanique d'un cheval attelé à un manége, marchant au pas, et travaillant huit heures sur vingt-quatre, par 40 1/2 kilogrammes élevés à un mètre de hauteur en une seconde de temps. L'unité dynamique, ou la force du cheval de *feu*, est variable pour les différens constructeurs; tantôt elle est portée à 60, 70, 75 et à 80 kilogrammes. Une machine à vapeur de six chevaux sera une machine capable de faire six fois ce travail. Les besoins ordinaires n'exigent que des machines de six à dix chevaux, mais il y en a de cinquante, de cent, et davantage. On voit même, dans les mines de Cornouailles, des machines qui ont la puissance de cinq cents chevaux.

L'unité dynamique, adoptée pour la mesure de la puissance des machines, n'ayant rien de précis ni de légal, pourrait souvent donner lieu à des contestations; il était à désirer qu'on eût un moyen simple et rigoureux d'estimer cette puissance. Voici celui qu'a proposé M. Prony.

Ce savant géomètre fixe à l'essieu du volant de la machine à vapeur dont il veut connaître la puissance, un appareil auquel il donne le nom de *frein* (*fig*. 206). Les parties CF et CF' se font équilibre, c'est-à-dire que leur centre de gravité passe par le centre de l'axe; mais le poids additionnel P tend à faire tourner le frein en sens opposé du mouvement

du volant indiqué par la flèche. Pour l'expérience, on suppose le frein serré sur l'arbre du volant, de telle manière que, pendant le mouvement de cet essieu, la branche CF se tienne horizontale, condition qu'on remplit à l'aide des boulons bb, aa.

La question se réduit à déterminer *l'effet dynamique* produit quand le frein est rendu horizontal pendant le mouvement de la machine (1).

Calcul des effets dynamiques des machines à vapeur.

324. On est convenu de prendre pour unité dynamique un mètre cube d'eau élevé à un mètre de hauteur.

1° Pour les machines à condensation sans détente, le calcul de l'effet se fait d'une manière fort simple.

Soit T la température de la vapeur de la chaudière; soit H la force élastique de la vapeur à cette température; soit t la température du condenseur, et h la force élastique correspondante; soit B la base du piston, L sa course, ce piston sera poussé par BLH moins BLh, ou $BL(H-h)$.... (1)

Si B et L sont exprimés en mètres, et H et h en hauteurs d'eau, le résultat sera le nombre de mètres cubes d'eau élevés à un mètre de hauteur.

2° Le calcul pour les machines à détente peut se faire très approximativement, à l'aide des principes élémentaires. Soient b la base du petit piston; l sa course; $H_{,}$ l'élasticité de la vapeur dans la chaudière et dans le petit cylindre; $H_{,,}$ l'élasticité dans le grand cylindre; h l'élasticité dans le condenseur: après la détente totale, on aura, pour la pression exercée sur le petit cylindre, $bl\left(H_{,}-\frac{H_{,}+H_{,,}}{2}\right.$.

La pression exercée sur le grand cylindre sera $BL\left(\frac{H_{,}+H_{,,}}{2}-h\right)$. On aura pour la force totale imprimée aux deux pistons par la vapeur,

$$bl\left(H_{,}-\frac{H_{,}+H_{,,}}{2}\right)+BL\left(\frac{H_{,}+H_{,,}}{2}-h\right)\text{.... (2).}$$

Il faut se rappeler que ce calcul n'est qu'une approximation. La vapeur dans le petit cylindre n'a pas tout-à-fait la même élasticité que dans la chaudière; d'une autre part, les moyennes arithmétiques ne sont pas non plus très rigoureuses. Enfin, pour faire le calcul, on devrait déterminer $H_{,}$ en admettant que la vapeur suit la loi de Mariotte dans son expansion (ce qui n'est pas très éloigné de la vérité à des pressions peu élevées), on écrira donc la proportion $H_{,}:H_{,,}::BL:bl$, d'où $H_{,,}=\frac{H_{,}bl}{BL}$ ou $\frac{H_{,}b}{B}$ (L et l étant en général égaux). Quoi qu'il en soit, ce calcul suffit pour donner une idée de l'avantage de l'emploi de la détente de la vapeur.

Application. Soit $B=24$; $b=10$; $T=140°$; $t=35°$.

La table n° 149 donne $H_{,}=2^{m},58$ et $h=0^{m},040$.

En multipliant $H_{,}$ et h par 13,586, densité de mercure, on aura les hauteurs en eau.

On trouvera à l'aide de ces données, et par les formules (1) et (2), le rapport entre les effets dynamiques d'une machine de Watt sans détente, et ceux d'une machine de Woolf avec détente.

325. *Détermination du maximum d'effet que peut produire la quantité de vapeur formée par la combustion d'un kilogramme de charbon, dans une machine ordinaire.*

H_{o} la pression de la vapeur dans le cylindre,
$H_{,}$ la pression dans le condenseur, } en hauteurs d'eau;

P le poids d'un mètre cube d'eau, à la même densité que celle qui donne les hauteurs H_{o} et $H_{,}$;

V_{o} le volume de la vapeur; l'effet de cette vapeur est donné par la formule $PV_{o}H_{o}-PH_{,}V_{o}$, ou bien $PH_{o}V_{o}\left(1-\frac{H_{,}}{H_{o}}\right)$; c'est-à-dire la pression exercée sur l'une des bases du piston par la vapeur de la chaudière, moins la pression exercée par la vapeur du condenseur.

$1-\frac{H_{,}}{H_{o}}$ est connu en nombre; il ne reste à calculer que $PH_{o}V_{o}$; dans cette expression, il n'y a que V_{o} d'inconnu. Il ne s'agit donc que de trouver cette quantité, ce qu'on peut aisément faire, par ce qui a été dit sur les vapeurs et les gaz. Si l'on appelle H la pression, et V le volume de la vapeur

(1) Soient P le poids attaché au point H;
R la distance entre le centre de gravité de ce poids, et l'axe de l'essieu: r le rayon de l'essieu; π le rapport de la circonférence au diamètre;
Q *l'unité dynamique*, égale à un poids convenu, multipliée par une hauteur également convenue, à laquelle on suppose ce poids élevé pendant l'unité de temps;
M le nombre *d'unités de force* mesurant l'effet *dynamique*, qu'il s'agit de déterminer.
M. Prony, à l'aide de quelques considérations mathématiques, parvient à la relation $M=\frac{2\pi NPR}{Q}$, dans laquelle π, P, R, Q, sont connus. N est égal à K, nombre de révolutions dans un temps donné, divisé par le nombre d'unités de temps; on a $\frac{K}{T}=N$. (Voyez *Ann. des Min.*, t. 12, p. 91; et *Ann. de Ch.*, t. 19, p. 165.)

à 100°, on a, en supposant que la loi relative aux gaz soit applicable aux vapeurs, $\frac{H_0}{H}$ $= \frac{V(1 + 0{,}00375\,t)}{V_0 \times 1{,}375}$; par conséquent $P\,H_0\,V_0 = P\,H\,V\,\frac{(1 + 0{,}00375\,t)}{1{,}375}$. Reste à calculer V ou le volume de vapeur à 100°, qu'on peut faire avec un kilogr. de charbon en prenant l'eau à la température du condenseur. Un kilogr. de charbon pur dégage 7914 degrés de chaleur; et en supposant l'eau à 30 degrés au moment où elle entre dans la chaudière, on trouve qu'un kilogr. de charbon volatilise $13^k{,}07$ d'eau, sous $0^m{,}76$, ce qui fait un volume de $13{,}07 \times 1^{me}{,}7$, ou $22^{me}{,}21$; ainsi l'on aura

$$P\,H_0\,V_0 = P\,0{,}76 \times 22^{me}{,}21\,\frac{(1 + 0{,}00375\,t)}{1{,}375},$$

où tout est connu. $P\,H_0\,V_0\left(1 - \frac{H_1}{H_0}\right)$ devient donc $\left(1 - \frac{H_1}{H_0}\right) P.\,0{,}76.\,22^{me}{,}21\,\frac{(1 + 0{,}00375\,t)}{1{,}375}$.

Voilà la puissance mécanique de la quantité de vapeur que produit un kilogr. de charbon, exprimée en kilogr., et agissant dans une machine sans détente, dans laquelle l'eau à son entrée dans la chaudière est à la température de 30°. Le nombre de degrés 7914 est celui dont, d'après nos expériences, s'élève un kilogr. d'eau par la combustion d'un kilogr. de charbon pur. Le nombre adopté dans tous les écrits relatifs aux machines à vapeur varie de 7000 à 7050 degrés. Ce nombre est, selon nous, trop faible. La combustion de la houille nous paraît même devoir dégager plus de 7914 degrés de chaleur. Cette substance renferme, il est vrai, 1/20 environ de matières terreuses; mais l'hydrogène dont elle n'est jamais exempte compense bien le 1/20 de matière inerte.

326. Les calculs pour déterminer d'une manière rigoureuse l'effet que peut produire la vapeur produite par la combustion d'un kilogr. de charbon, sont trop compliqués pour que nous les rapportions ici. (Voyez *Ann. des Min.*, t. 9, un mémoire de M. Combes, etc.)

MACHINES LOCOMOTIVES.

1°. *Bateaux à vapeur.*

327. Papin conçut l'application des machines à vapeur à la navigation dès 1695; Jonathan Hull publia en 1736 la description d'un bateau à vapeur; Perrier en exécuta un sur la Seine en 1775; mais c'est le mécanicien américain Fulton qui remplit le premier les conditions exigées pour la vitesse de ces bateaux.

Cette nouvelle application de la science est mise en pratique en Amérique depuis 1807, en Angleterre depuis 1812, et en France depuis 1816.

Les roues des bateaux à vapeur sont à aubes. Le mouvement de rotation est imprimé aux roues à l'aide d'un arbre de couche qui reçoit son mouvement directement ou indirectement de la bielle. A cause du peu de hauteur des bâtimens à vapeur, le balancier est placé en bas; quelquefois une seule roue, placée à l'arrière, détermine le mouvement du bâtiment; le plus souvent il y en a deux sur les côtés. L'arbre des roues tantôt est placé transversalement au milieu, tantôt en est éloigné à une certaine distance. Ici, comme dans toutes les machines à vapeur, on régularise le mouvement à l'aide d'un volant; deux machines à vapeur peuvent y suppléer. Par exemple, le bâtiment qui va de Paris au Havre possède deux machines à simple pression. Le piston de l'une de ces machines monte quand le piston de l'autre descend, et réciproquement. De cette manière le mouvement de l'arbre de couche est rendu régulier sans le secours d'un volant.

La machine à basse pression était d'abord la plus communément employée. Aujourd'hui on emploie des machines à moyenne et même à haute pression.

(*Voyez* l'ouvrage de M. Marestier, le cours de M. Dupin, une note de M. Molard, *Ann. de Ch. et de Ph.*, t. 23, etc.; et dans l'*Annuaire* de 1830 une discussion de M. Arago.)

2° *Voitures à vapeur.*

328. Les machines à vapeur sont aussi employées depuis plusieurs années sur les routes-ornières, ou *chemins de fer*. Elles y servent à traîner, avec une vitesse de 3, 4 et 5 lieues et plus à l'heure, des convois de 8, 12 et 16 chariots chargés de marchandises ou de voyageurs. On a obtenu même une vitesse de 15 lieues à l'heure, et sur les routes ordinaires cette vitesse est réduite à 2 à 3 lieues.

Ces machines sont, comme on doit bien le penser, sans condensation et n'agissent que sous des pressions de 3 à 4 atmosphères, et elles sont ordinairement de la force de 8 ou 10 chevaux.

On les a rendues, dans ces derniers temps, d'un emploi plus facile et moins dispendieux. On les voit aujourd'hui en Angleterre et en France.

Armes à vapeur.

329. M. Perkins, en Angleterre, a fait des essais pour lancer directement des projectiles au moyen de l'élasticité de la vapeur; il est parvenu à lancer

un nombre considérable de balles avec une très grande rapidité. Ces balles avaient assez de force pour percer à une grande distance des planches de sapin d'onze lignes d'épaisseur. Elles étaient placées dans une espèce de trémie, tombaient régulièrement dans le canou, et au même instant étaient chassées par la vapeur.

Cet ingénieur espérait pouvoir lancer, par le même moyen, des boulets de différens calibres; mais M. le capitaine d'artillerie Madelaine a démontré que le projet de M. Perkins n'est pas susceptible d'une application utile pour la guerre; que cet ingénieur ne parviendrait pas à lancer avec assez de force les projectiles de l'artillerie, même les plus faibles (les boulets de 4). M. Madelaine, envisageant la question sous un autre point de vue, a proposé d'utiliser pour la défense *rapprochée* des places fortes, les machines à vapeur *ordinaires*, en les faisant servir comme moteurs d'un ou de plusieurs volans d'un grand diamètre, doués d'une très grande vitesse, qui leur serait communiquée à l'aide d'un simple engrenage. Ces volans seraient armés de palettes fortes et élastiques qui chasseraient un à un des projectiles de même calibre et dont le poids pourrait aller jusqu'à 16 livres, jetés pêle-mêle dans une trémie faisant système avec l'arbre du volant qui pourrait pivoter. Ces machines seraient établies dans des casemates, etc., etc. (Voyez le *Journal des Sciences militaires*, janvier 1827.)

Machines mues par l'acide carbonique, etc.

330. On a proposé la vapeur de mercure, le gaz acide carbonique, comme moteurs. L'emploi de la vapeur de mercure présente évidemment trop d'inconvéniens. Nous donnerons une idée de la machine de M. Brunel, ingénieur français, établi depuis long-temps à Londres. Cet habile mécanicien, qui a étonné différentes fois les Anglais par la hardiesse de ces conceptions, a imaginé une machine dont l'acide carbonique, alternativement liquéfié et gazéifié, serait le moteur.

Le gaz acide carbonique est réduit à l'état liquide par une pression de 36 atmosphères à la température de la glace. La force élastique de cet acide s'accroît de plus du double par une élévation de température de 40 à 50 degrés. C'est sur ce développement considérable d'élasticité par un changement assez léger de température, qu'est fondée la nouvelle machine de M. Brunel.

La *fig.* 203 en présente une coupe verticale. Le cylindre du milieu *A B* renferme le piston *P*, qui doit être mis en mouvement.

Les deux cylindres *C* et *C'* sont tout-à-fait semblables; ils sont remplis d'huile jusqu'à la moitié de leur hauteur; l'huile est recouverte d'un flotteur *F*. Chacun de ces cylindres est renfermé dans une enveloppe; l'espace *E* ou *E'* compris entre celle-ci et le cylindre est destiné à recevoir alternativement de l'eau chaude et de l'eau froide.

Les deux cylindres *D* et *D'* reçoivent l'acide carbonique d'un grand gazomètre, à l'aide d'une pompe foulante. Quand l'acide est liquéfié dans chacun des cylindres, *C*, *C'*, on ferme les ouvertures *O* et *O'*, par lesquelles il a été introduit.

La machine étant dans cet état, on fait arriver de l'eau chaude dans l'enveloppe de l'un des cylindres, du cylindre *C*, par exemple; l'acide se gazéfie, comprime le flotteur *F*, et fait monter le piston *P*; l'eau chaude arrive ensuite dans l'enveloppe *E'*; et l'eau froide dans l'enveloppe *E*; le piston descend. On voit que le piston est poussé par la différence entre l'élasticité de l'acide carbonique à la température ordinaire et celle qu'il possède à la température de 50 à 60 degrés.

Cette machine n'a pas encore été établie en grand; elle présente plusieurs inconvéniens; la haute pression de l'intérieur exige que toutes les parties soient faites avec un soin extrême pour empêcher les fuites et même les explosions. Les changemens continuels de températures des cylindres qui renferment l'acide carbonique, doivent les détériorer promptement. La consommation d'une quantité considérable d'eau chaude doit encore augmenter les frais; en sorte qu'il est probable que cette nouvelle machine ne présente pas d'avantages réels dans la pratique; mais elle offre une application ingénieuse des propriétés des gaz. C'est pour cette raison que nous avons cru devoir la faire connaître.

Au reste les expériences récentes de M. Thilorier sur l'acide carbonique liquide, permettront peut-être de réaliser ces nouvelles machines sous une forme plus simple.

Des Explosions des Machines à vapeur.

331. Il arrive malheureusement quelquefois que les soupapes de sûreté n'empêchent pas les explosions. Ces explosions sont souvent accompagnées d'un développement immense de force. 1° Nous citerons plusieurs exemples. Le 3 février 1814, dans une distillerie de Locrin, près d'Édimbourg, une chaudière à vapeur qui marchait sous 4 atmosphères, fit explosion : une partie de la chaudière, pesant 140 quintaux, renversa le toit, et s'éleva à 70 pieds de hauteur. Le 4 mars 1827, plusieurs chaudières du bateau *le Rhône* éclatèrent en même temps, avec projection de masses pesant 30 quintaux à plus de 250 mètres de distance; l'ingénieur venait de charger outre mesure les soupapes de sûreté. Ces explosions ont été occasionées par une surcharge des soupapes. L'explication en est toute simple. Il n'est pas aussi facile de concevoir les explosions qui ont été précédées d'un grand affaiblissement dans le ressort de la vapeur.

2° Nous pourrions citer plusieurs exemples d'explosions précédées, soit de l'ouverture, soit du déchargement des soupapes, soit enfin d'un affaiblissement notable dans l'élasticité de la vapeur. Des praticiens distingués, M. Tabaresu, M. Rey, etc., ont vu l'ouverture des soupapes suivie de l'accroissement du ressort de la vapeur. MM. Arago et Dulong ont observé le contraire dans les expériences dont nous avons rapporté les principaux résultats n° 196.

Voici une explication des explosions développées au moment même où l'on ouvre la soupape; quand l'eau est peu abondante, il peut arriver que la partie supérieure de la chaudière soit à la température rouge, ainsi que la vapeur qui la touche; et que l'élasticité de l'intérieur de la chaudière soit diminuée, parce que la surface de l'évaporation est plus petite que dans les circonstances où la machine marche régulièrement.

Il peut arriver dans la même circonstance que l'eau ne soit qu'à cent et quelques degrés. Si maintenant l'on ouvre la soupape, la pression diminuera, une portion de l'eau sera projetée contre la partie supérieure de la chaudière, se réduira subitement en vapeur, et acquerra une élasticité qui sera capable de vaincre la résistance de la chaudière, et déterminera une explosion.

Dans quelques circonstances, les petits cylindres des chaudières à foyer intérieur, ne pouvant résister à la pression de la vapeur contenue dans l'espace annulaire, s'aplatissent, se déchirent, et l'eau chaude, se répandant subitement dans les ateliers, cause de grands accidens. Il faut nécessairement que dans ce cas il se forme un vide dans le petit cylindre. Si l'on ferme le registre de la cheminée, et que la porte du foyer reste ouverte, le gaz continuant à se dégager du charbon, pourra être en quantité propre à détoner avec l'air du foyer, un vide succédera à la détonation : l'explosion du cylindre suivra cette détonation; telle est l'explication donnée par M. John Taylor, de l'explosion des Mold-Mines, où une bouffée de flammes précéda l'explosion du cylindre intérieur.

M. Arago, dans un article (*Annuaire* 1830) d'où nous empruntons les faits cités, observe qu'il serait utile de donner plus de largeur aux ouvertures des soupapes. Le même savant fait remarquer que les essais qu'on fait subir aux chaudières ne garantissent pas complètement contre les explosions, 1° parce que les essais sont à froid, et que la ténacité du fer forgé est beaucoup moindre à chaud qu'à froid; 2° parce qu'une augmentation brusque dans l'élasticité de la vapeur peut occasioner une rupture là où une pression graduée n'avait rien produit; 3° parce que la chaudière se détériore rapidement avec le temps; 4° parce que la soupape de sûreté, restant long-temps en repos, peut perdre de sa mobilité par suite de l'oxidation.

(Voyez dans l'*Annuaire* de 1829 un article étendu dans lequel M. Arago discute avec beaucoup de soin l'histoire complète de la machine à vapeur.)

DE L'ÉLECTRICITÉ.

332. Cette belle branche de la physique doit aux découvertes modernes la plus grande partie de ses progrès. Pendant plusieurs siècles nos connaissances sur ce sujet se sont bornées à ce que les anciens nous avaient appris sur la propriété que l'ambre acquiert par le frottement d'attirer les corps légers.

333. *Notions préliminaires.* 1° Si l'on frotte un tube de verre, ou un morceau d'ambre, ou un bâton de cire d'Espagne, avec une étoffe de laine ou une peau de chat, on remarque que les corps légers qu'on en approche sont attirés et précipités sur eux.

La cause de cette nouvelle propriété a été appelée *électricité*, parce que les phénomènes de ce genre ont été observés pour la première fois dans l'ambre, dont le nom grec est ηλεκτρον. Ce fait était déjà connu du temps de Thalès de Milet, qui vivait 600 ans avant l'ère chrétienne.

Si l'on porte près de la joue un bâton de verre ainsi frotté on éprouve une sensation pareille à celle que produirait une toile d'araignée.

Si l'on en approche le doigt, ou une boule de métal, on entend le pétillement d'une étincelle lumineuse. Dans l'obscurité le tube est couvert lui-même d'une lumière bleuâtre.

On a remarqué encore que les corps ainsi frottés répandent une odeur particulière.

2° Cette propriété appartient à tous les corps simples ou composés, solides, liquides ou gazeux. Par exemple, si l'on agite du mercure dans un vase de verre, on trouve le verre électrisé. On fait encore la même expérience, en plaçant du mercure dans une capsule de bois fixée à l'extrémité supérieure d'un large tube de verre; si l'on fait ensuite le vide dans le tube, bientôt le mercure, pressé par le poids de l'atmosphère, tombe sous la forme de pluie dans l'intérieur. Alors, en approchant des corps légers du tube, on voit qu'il est électrisé.

On tire de là l'explication d'un phénomène que présentent les baromètres bien purgés d'air. Quand on penche ces baromètres de manière que le mercure remplisse rapidement tout le tube, on voit, si l'expérience est faite dans l'obscurité, se développer une lumière phosphorescente tout-à-fait semblable à celle que produit l'électricité dans le vide. Ce phénomène paraît dépendre de la condensation de la vapeur mercurielle, car lorsqu'on fait l'expérience à zéro ou au-dessous, on n'observe aucun mouvement de lumière.

Un corps solide peut aussi, par le frottement d'un gaz, s'électriser d'une manière sensible. Ainsi, qu'on dirige, au moyen d'un soufflet, un courant d'air contre un carreau de verre, on le mettra dans l'état électrique. Il serait difficile de prouver directement que dans le frottement mutuel de deux gaz, il y a de l'électricité dégagée, mais on le conçoit bien par analogie; il est même probable qu'une partie de l'électricité répandue dans l'atmosphère provient du frottement de l'air contre lui-même et contre les nuages.

3° L'action électrique se propage à distance, et à travers toutes les substances. Ainsi une petite boule de moelle de sureau suspendue à un fil de soie, sous une cloche de verre, est attirée par un bâton de cire d'Espagne placé hors de la cloche, et préalablement électrisé.

4° L'électricité se propage à travers tous les corps; mais les corps, considérés sous le rapport de la propriété de conduire l'électricité, diffèrent singulièrement entre eux; les uns, comme les métaux, l'eau, et en général tous les liquides (huiles exceptées), le charbon calciné, sont de bons conducteurs; les résines, et particulièrement celle qui porte le nom de gomme laque, la cire d'Espagne, la soie, le soufre, les pierres, le verre, les oxides, l'air et les autres gaz analogues, sont de mauvais conducteurs; la distinction entre les corps bons conducteurs et mauvais conducteurs a été établie par Grey et Wheeler en 1729. (*Histoire de l'Électricité*, t. 1, 56.) Avant cette découverte l'électricité ne pouvait former une science.

Pour constater la différence qui existe entre les corps conducteurs et les corps non conducteurs, prenez deux petites boules de moelle de sureau, entièrement semblables; suspendez l'une à un support de verre par un fil de verre ou de soie; suspendez l'autre à un support de métal par le moyen d'un fil métallique; donnez à ces deux boules de l'électricité en les touchant avec un bâton de verre électrisé; vous remarquerez que la boule suspendue à un fil métallique a perdu instantanément son électricité, tandis que celle qui est suspendue au fil de soie a bien conservé la sienne; or il n'y a de différence que dans la manière dont ils communi-

quent avec la terre; pour l'une des boules, cette communication étant établie par un métal, l'électricité trouve un passage facile, et se dissipe en totalité; l'autre boule, étant séparée du sol par une substance peu conductrice, n'éprouve aucune perte; remplacez le fil de soie par un fil de résine, de soufre, etc., vous obtiendrez le même résultat. Toutes ces substances sont donc impropres à transmettre l'électricité. Mouillez les fils avec de l'eau, à l'instant toute l'électricité disparaîtra, parce que l'eau est un bon conducteur.

On peut faire beaucoup d'autres expériences propres à établir la même distinction. Touchez le conducteur d'une machine électrique avec un bâton de verre ou de résine, vous ne diminuerez pas d'une manière notable la tension de l'électricité; remplacez le bâton de verre ou de résine par un fil métallique, vous verrez à l'instant la machine se décharger.

Un corps est isolé quand il a pour support un mauvais conducteur, un fil de soie, un bâton de cire d'Espagne, un tube de verre, etc. On appelle *tabouret* électrique une petite table dont les pieds sont en verre. Il est beaucoup de circonstances où l'on doit isoler les corps qu'on soumet aux expériences. Par exemple, veut-on savoir si les métaux deviennent électriques par le frottement, il faut les isoler par un manche de verre; si on les frotte ainsi isolés, avec une peau de chat ou avec une étoffe de laine, on verra qu'ils s'électrisent comme les corps mauvais conducteurs; tandis que si on les tenait dans la main en même temps qu'on les frotte, l'électricité se dissiperait dans le sol.

L'air atmosphérique sec est un très mauvais conducteur; mais s'il est chargé de beaucoup d'eau, il devient bon conducteur: aussi est-il tout-à-fait impossible de faire des expériences électriques pendant les temps humides, parce que l'électricité se dissipe à mesure qu'elle est produite, et l'on a reconnu que les expériences ne réussissent jamais mieux que dans les temps froids et secs, où il y a très peu de vapeur dans l'air.

Il faut cependant dire que la difficulté de faire des expériences électriques par les temps humides, tient surtout à ce que l'air, étant près de son point de saturation, dépose sur tous les corps une partie de sa vapeur.

5° L'électricité ne change pas les dimensions des corps: en effet, qu'on plonge un thermomètre à mercure très sensible dans un vase métallique rempli d'eau, et qu'on électrise fortement le liquide et le vase par le moyen de la machine électrique, le thermomètre sera tout-à-fait stationnaire. (L'abbé Nollet.)

Cette expérience est concluante, à moins toutefois que tous les corps ne se dilatent ou ne se contractent tous dans le même rapport par l'électricité.

6° La vitesse de l'électricité paraît immense; suivant M. C. Wheastone, cette vitesse est de 144,000 lieues par seconde (Institut. 1834).

7° L'air est, comme nous l'avons déjà dit, un très mauvais conducteur; il maintient par sa pression l'électricité à la surface des corps; ce qui le prouve, c'est que si l'on place sous le récipient de la machine pneumatique un corps conducteur électrisé et isolé sur des supports de résine ou de verre, ce corps peut même, avant que le vide soit complètement fait, perdre toute l'électricité dont il est chargé. Si l'on fait la même expérience avec un corps non conducteur, par exemple avec un bâton de cire d'Espagne électrisé par le frottement, l'électricité se dissipe aussi dans le vide, mais avec plus de lenteur, et il faut un temps assez long pour que le corps en soit tout-à-fait dépouillé.

Ce dernier résultat montre qu'à la surface des corps non conducteurs l'électricité est retenue par la pression de l'air, jointe à la difficulté qu'elle éprouve à se dégager de leurs particules.

8° La terre, dans laquelle s'écoule et se perd l'électricité, porte le nom de *réservoir commun*.

9° Pour que le développement de l'électricité par le frottement soit facile, il faut préalablement sécher le corps qu'on veut soumettre aux expériences; il est aussi indispensable de chauffer le lieu des observations, afin que l'air, devenant ainsi capable de prendre de nouvelle vapeur, n'en laisse pas déposer sur les corps qu'il enveloppe.

333 *bis*. Reprenons les premières expériences, examinons plus attentivement les propriétés des corps électrisés. Pour cela attachons à un bâton de résine deux petites boules de sureau par deux fils métalliques (*fig.* 215), et frottons cette substance avec une étoffe de laine; nous verrons les deux boules se repousser à une certaine distance. Faisons l'expérience avec un bâton de résine et une seule boule; approchons cette dernière boule des deux premières, il y aura répulsion.

Répétons ces deux expériences en remplaçant le bâton de résine par un bâton de verre, nous verrons les boules se repousser de même.

Maintenant si nous approchons les boules électrisées par le verre de celles qui le sont par la résine, il y aura attraction. En poursuivant les mêmes essais nous reconnaîtrions, 1° que deux corps *chargés de la même espèce d'électricité se repoussent; 2° que deux corps chargés d'électricité de nature différente s'attirent.*

De plus, il résulte des expériences que, parmi tous les corps, les uns, en général, donnent la même électricité que le verre frotté avec une étoffe de laine ou de soie: ce sont les oxides, les pierres, etc. On l'a appelée *électricité vitrée*. Les autres en général donnent la même électricité que la résine frottée avec une peau de chat, la laine ou la soie; ce sont les corps inflammables, l'ambre, la soie, etc. Elle a reçu le nom d'*électricité résineuse* (1). Cette belle découverte a été faite en

(1) Comme le verre ne prend pas toujours l'électricité *vitrée*, et la résine l'électricité *résineuse*, et que d'un

1733 et 1734 par Dufay, membre de l'Académie des Sciences.

334. L'étoffe de laine, la peau de chat, et toutes les matières dont on se sert pour frotter un corps solide, se chargent d'électricité négative si ce corps acquiert l'électricité positive, et réciproquement. Pour le prouver, on n'a qu'à présenter à un pendule électrique l'étoffe qui a servi à électriser la résine; elle attirera les petites boules de sureau chargées d'électricité négative, et repoussera les boules chargées d'électricité positive.

335. En cherchant la nature de l'électricité développée par le frottement d'un grand nombre de substances, on reconnaît qu'elle n'a rien d'absolu, et qu'elle dépend autant de la nature du corps frottant que de celle du corps frotté. Par exemple, la soie frottée avec le verre poli acquiert l'électricité positive; frottée avec la résine, elle acquiert l'électricité négative; un bâton de verre poli, frotté avec une étoffe de laine, s'électrise positivement; frotté avec une peau de chat, il s'électrise négativement.

Dans la table suivante, chaque substance acquiert l'électricité positive lorsqu'on la frotte avec une de celles qui la suivent, et l'électricité négative quand on la frotte avec une de celles qui la précèdent.

Peau de chat.	Le papier.
Le verre poli.	La soie.
L'étoffe de laine.	La gomme laque.
Les plumes.	Le verre dépoli.
Les bois.	

On a fait beaucoup d'essais pour trouver les circonstances qui déterminent chacun des corps cités à prendre l'espèce particulière d'électricité qu'il acquiert; mais tous les essais n'ont rien appris de bien concluant.

A l'occasion de la production de l'électricité nous citerons une expérience curieuse, qu'on répète souvent dans les cabinets de physique. Deux personnes montent sur des tabourets isolans; l'une tient dans la main une peau de chat bien sèche, et en frappe l'autre; la première se charge d'électricité positive, la seconde d'électricité négative. Un petit pendule dans l'état naturel sera attiré par les deux personnes; toutes les deux donneront des étincelles à l'approche des corps conducteurs qui communiquent avec le sol, et seront enveloppées d'une atmosphère lumineuse dans l'obscurité. Un pendule préalablement chargé d'électricité positive sera repoussé par la première et attiré par la seconde.

autre côté les deux électricités détruisent réciproquement leurs propriétés par leur réunion, on est généralement convenu de remplacer les expressions d'électricité *vitrée* et de *résineuse* par celles de *positive* et de *négative*, en attachant à celles-ci le sens qu'on attache en géométrie aux ordonnées positives ou négatives.

336. Le frottement n'est pas la seule manière de développer de l'électricité; mais c'est la plus commune et la plus anciennement connue; l'électricité se développe dans une infinité de circonstances. Il résulte d'expériences de M. Peclet, que la tension de l'électricité, développée par le frottement, est indépendante de la vitesse de la pression, de l'épaisseur des corps frottans, de l'étendue du contact et du mode de frottement.

Nous verrons plus loin que la *compression*, le *changement de température*, les *combinaisons chimiques*, etc., sont des sources d'électricité.

Par exemple, un bâton de verre s'électrise par son immersion dans le mercure (M. Dessaignes). C'est peut-être aussi à l'électricité qu'il faut attribuer cette lumière que développe le choc des blocs de glace des mers polaires.

337. Quel que soit le mode employé, toujours on donne naissance aux deux électricités négative ou positive. Il faut avouer cependant qu'il n'est pas toujours également facile d'en démontrer la présence; c'est pourquoi nous attendrons que nous ayons des instrumens assez délicats pour étudier ces circonstances avec fruit.

Des Lois que suivent les actions électriques.

338. L'électricité exerce, comme nous l'avons vu, son action à des distances sensibles. Pendant longtemps on a admis sans le démontrer, que les actions électriques suivaient la loi des actions planétaires, c'est-à-dire qu'elles décroissaient en intensité comme le carré des distances.

C'est à Coulomb, physicien français, qu'appartient l'honneur d'avoir démontré par l'expérience la loi des actions électriques. Il a fait cette belle découverte au moyen de la balance de torsion, instrument ingénieux dont il a enrichi les sciences.

L'instrument dont il s'agit est fondé sur cette propriété que possèdent les fils métalliques d'avoir une force de réaction proportionnelle à l'angle de torsion (n° 74).

La sensibilité de cet instrument est tellement grande qu'on peut le faire servir à mesurer avec précision des forces qui n'excèdent pas le poids d'un dix millième de grain.

339. Cet appareil est formé (*fig.* 314) d'un cylindre de verre *A B* de 12 pouces de diamètre et de 18 pouces de hauteur, couvert d'un plateau *A D* en verre de 13 pouces de diamètre; le plateau est percé de deux trous de 20 lignes de diamètre, l'un au milieu en *f* sur lequel est cimenté un tube de verre de 24 pouces de hauteur, portant à l'extrémité supérieure un micromètre de torsion. Ce micromètre est composé d'un tuyau en cuivre, introduit à frottement dans le tube de verre, et portant une plaque *n m* percée d'un trou dans son milieu, pour recevoir une petite tige, à laquelle est attachée une ai-

guille $e\,n$, qu'on fait tourner en même temps que la tige. La plaque est divisée sur son bord en 360 parties. La forme de la tige est à peu près celle de l'extrémité d'un porte-crayon solide, qui peut se serrer au moyen d'un anneau. C'est dans la pince de ce porte-crayon qu'est saisie l'extrémité d'un fil d'argent très fin, dont l'autre extrémité est fixée par la pince d'un cylindre $p\ r$ en cuivre. Ce petit cylindre est percé et renflé en C (*fig.* 216) pour recevoir l'aiguille $a\ g$. Il faut que le poids de ce cylindre soit assez considérable pour tendre le fil sans le rompre. L'aiguille $a\ g$ est suspendue à peu près à la moitié de la hauteur du grand vase qui la renferme, et formée ou d'un fil de soie enduit de cire d'Espagne, ou d'une paille également enduit de cire d'Espagne, et terminée depuis g jusqu'en a par un fil cylindrique de gomme laque : à l'extrémité a de cette aiguille est une petite balle de sureau de deux à trois lignes de diamètre; en g est un petit plan vertical de papier passé à la térébenthine, qui sert de contre-poids à la balle a et qui ralentit les oscillations.

Nous avons dit que le couvercle $A\ D$ est percé d'un second trou w. C'est par ce trou qu'on introduit un petit cylindre $w\ t$ terminé par un fil de gomme laque, auquel est attachée une balle également de sureau. Autour du vase, à la hauteur de l'aiguille, l'on trace un cercle $k\ s$ divisé en 360 degrés. Le trou w correspond à peu près au zéro de cette division.

Quand on veut se servir de cet instrument, on place l'aiguille $n\ m$ du micromètre supérieur sur le zéro de la division; on fait ensuite tourner tout le micromètre dans le tube vertical, jusqu'à ce que l'aiguille $a\ g$ correspondé à la première division du cercle $k\ s$. On électrise un petit conducteur (*fig.* 218), qui n'est autre chose qu'une épingle à grosse tête, que l'on a isolée en l'enfonçant par la pointe dans l'extrémité d'un bâton de cire d'Espagne; on introduit cette épingle dans le trou w, et on lui fait toucher la boule t en contact avec la boule a : on retire l'épingle, et les deux boules étant chargées de la même espèce d'électricité, se repoussent mutuellement à une distance qu'on mesure. On tourne ensuite le micromètre supérieur de manière à tordre le fil de suspension, et conséquemment à rapprocher les boules. On observe, par ce moyen, les distances auxquelles différens angles de torsion ramènent la boule a vers la boule t; et par la comparaison des forces de torsion aux distances correspondantes des deux boules, on détermine la loi de la répulsion.

340. *Expériences.* La boule a a été repoussée à 36 degrés de la boule t, l'index du micromètre supérieur étant à zéro.

Le fil de suspension ayant été tordu par la partie supérieure de 136 degrés, les deux boules se sont rapprochées et arrêtées à 18 degrés de distance.

Ainsi, à 36° de distance, la réaction électrique fait équilibre à 36° de torsion; à 18° de distance, la même réaction fait équilibre à 126° + 18° = 144°. Ainsi, les intensités électriques décroissent comme le carré des distances.

Les expériences doivent être faites pendant les jours où l'air est le plus sec, afin d'atténuer la perte d'électricité occasionée par l'air et par les supports; dans tous les cas, il convient de connaître cette perte pour établir la correction.

Le jour des expériences dont il est question, la perte était très faible, ce qui tenait à la sécheresse de l'air et à l'excellent choix des supports; afin de maintenir l'intérieur de l'appareil dans un état constant de sécheresse, on doit y placer des petits bocaux pleins de chaux.

La distance des deux boules, lorsqu'elles sont éloignées l'une de l'autre par leur action répulsive réciproque, n'est pas précisément mesurée par l'arc de l'angle qu'elles forment, mais par la corde de l'arc qui joint leurs centres. D'une autre part, l'action répulsive de la boule fixe sur la boule mobile devient d'autant plus oblique que la distance est plus grande; mais la construction de la machine a cela d'heureux que les deux causes agissent en sens opposé. La compensation est d'autant plus exacte que la distance est plus petite. (*Mémoires de l'Académie des Sciences*, 1785, p. 569.)

Vérifications. Admettons la loi précédente. La force avec laquelle les deux boules s'attireront ou se repousseront sera réciproque au carré de la distance de leurs centres (n° 17) (1).

(1) Représentons par F l'intensité de cette force à l'unité de distance des deux boules; elle deviendra $\frac{F}{D^2}$ à la distance D, et s'exercera suivant la corde $a\ b$ qui joint les deux boules (*fig.* 209).

Cette force $\frac{F}{D^2}$ agissant dans une direction oblique à cb, doit être décomposée en deux autres forces, l'une perpendiculaire à $c\ b$, et l'autre dans la direction $c\ b$. Cette dernière est détruite par la résistance du point c; on peut la négliger. La première, la seule qui fasse équilibre à la force de torsion est égale à $\frac{F}{D^2}$ cos. abl, d'après la règle du parallélogramme des forces. Les angles $a\ b\ l$ et $k\ c\ b = 1/2\ a\ c\ b$ sont égaux comme ayant leurs côtés perpendiculaires; si l'on désigne ce dernier par C, on aura $\frac{F}{D^2}$ cos. $1/2\ C$ pour la force employée à repousser les deux boules.

On peut aussi exprimer la distance D en fonction de l'arc a. En effet, la perpendiculaire $c\ k$, menée du centre c sur la corde $a\ b$, la divisera en deux parties égales $a\ k$ et kb; et en désignant par r la rayon $c\ b$, on aura $D = 2\ r \sin. 1/2\ C$; et en remplaçant D par cette valeur, l'expression de la force de torsion deviendra $\frac{F \cos. 1/2 C}{4r^2 \sin.^2 1/2 C}$.

Soit B le nombre total de degrés de torsion du fil dans le cas d'équilibre; la force de torsion est proportionnelle à cet arc, et peut être représentée par $m\ B$; m étant un

Le calcul de la note ci-jointe, fondé sur cette loi, et des données de statique certaines, fournit l'équation $\frac{F}{4 r^2 m} = B \sin. 1/2\, C \tang. 1/2\, C$, dont le premier membre est formé entièrement de quantités numériques; le second doit être constant dans toutes les expériences, si la loi est vraie; en effet, on voit par le tableau ci-joint que quel que soit l'angle où l'aiguille ait été chassée, cette expression conserve sensiblement la même valeur 3,6.

	C.	B.	Bsin. 1/2 C tang. 1/2C.
1re Expérience	36	36	3,614
2e Expérience	18	144	3,568
3e Expérience	84,2	5751/2	3,169
La même en supposant	9	576	3,557

Les deux premiers résultats sont bien d'accord. L'écart du troisième répond à une erreur d'un demi-degré dans l'observation de l'arc. Cette erreur dépend en partie de la perte de l'électricité pendant l'expérience, et des nouveaux phénomènes qui se développent à une aussi petite distance. (*Voyez* plus loin les articles *Perte* et *Influence*.) Nous pouvons faire abstraction de cet écart, et regarder comme bien établie la loi que nous avons trouvée par la balance de torsion.

Des expériences analogues à celles que nous venons de rapporter ont prouvé que les attractions électriques suivent la même loi que les répulsions.

341. Coulomb a encore démontré la loi des attractions électriques par une autre méthode. Elle est moins directe que la précédente, mais elle a l'avantage d'être plus facile.

Cette méthode consiste à suspendre une aiguille dont l'extrémité seule est électrisée, et qui, placée à une certaine distance d'un globe chargé d'une électricité de nature différente, oscille en vertu de son action. L'on détermine ensuite par le calcul, d'après le nombre des oscillations faites dans un temps donné, la force attractive à différentes distances, comme l'on détermine la force de la gravité par les oscillations du pendule ordinaire (*Académie des Sciences*, 1785, p. 581).

L'aiguille est un fil de gomme laque, de 15 lignes de longueur, suspendu à un fil de soie de 7 à 8 pouces, tel qu'il sort du cocon. A une extrémité de l'aiguille on fixe perpendiculairement à sa direction un petit cercle de papier doré, 7 à 8 lignes de diamètre. L'extrémité supérieure du fil de soie est attachée à un bâton de cire d'Espagne. La flexibilité de cette suspension est extrêmement grande. Il suffirait d'un poids d'un cent vingt millième de grain appliqué à l'extrémité de l'aiguille horizontale pour la faire marcher d'un cercle entier. On abandonne d'abord ce fil à lui-même dans un lieu bien calme, afin de détruire tout-à-fait la torsion qu'on aurait pu lui donner par hasard.

Le globe est en cuivre ou en carton couvert d'étain (voyez *Distribution de l'électricité*), et porté sur quatre tubes de verre, surmontés chacun d'un petit cylindre de cire d'Espagne. Il est placé de manière qu'on puisse le faire monter ou descendre jusqu'à ce qu'il ait son centre en face de l'extrémité de l'aiguille. On peut aussi l'en approcher ou l'en éloigner.

Le tout étant ainsi disposé, on donne au globe une certaine quantité d'électricité au moyen d'une bouteille de Leyde ou de toute autre manière; on donne en même temps à l'aiguille une électricité contraire, de sorte que le globe et l'aiguille agissent l'un sur l'autre par attraction. On trouve ainsi les résultats suivans :

Distance du centre du globe au centre du cercle doré.	Durée de quinze oscillations
9 pouces.	30″
10	40
24	60

Comme le cercle doré n'a que 7 lignes de diamètre, et qu'il ne s'éloigne et ne s'approche du globe, pendant une même expérience, que d'une quantité peu sensible, la force attractive du globe sur ce cercle est constante; et si à l'unité de distance on la désigne par F, elle deviendra $\frac{F}{D^2}$ à la distance D. Ici on peut considérer comme des points le globe à cause de sa sphéricité, et le cercle à cause de sa petitesse.

De plus, comme l'étendue des oscillations est fort petite, et que l'aiguille est éloignée du globe d'une quantité fort considérable comparativement à sa longueur, il s'ensuit que les lignes menées du cercle de papier au centre du globe dans les diverses périodes d'une oscillation, sont parallèles. Les formules du pendule (nº 24) sont donc applicables ici.

Si l'on nomme l la longueur du pendule, T la durée d'une oscillation, g l'intensité de la force attractive, on a :

$$T = \pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$

coefficient qui est particulier au fil employé, ou la force correspondante à un degré de torsion, il y a égalité entre ces deux forces, puisque nous supposons l'équilibre établi; on aura donc $\frac{F \cos. 1/2\, C}{4 r^2 \sin.^2 1/2\, C} = m B$. D'où $\frac{F}{4 r^2 m} = B \frac{\sin. 2\, 1/2\, C}{\cos. 1/2\, C}$ ou bien, en remplaçant $\frac{\sin. 1/2\, C}{\cos. 1/2\, C}$ par sa valeur tang. 1/2 C, on aura $\frac{F}{4 r^2 m} = B \sin. 1/2\, C \tang. 1/2\, C$. (A)

Dans notre expérience g doit être remplacé par $\frac{F}{D^2}$, ce qui conduit à $T = D\pi\sqrt{\frac{l}{F}}$

Cette formule indique qu'avec une même aiguille et une même force attractive F, les temps des oscillations sont proportionnels aux distances D. C'est aussi à peu près ce qui résulte des observations rapportées à la page précédente.

Les deux premières sont bien d'accord; la troisième aurait dû donner 53″ 1/3.

Il faut remarquer que la durée des trois essais a été de quatre minutes; que le jour de l'expérience l'électricité perdait 1/40 par minute. En faisant la correction (1) on trouve que la durée aurait dû être de 57″ s'il n'y avait pas eu de perte, au lieu de 53 1/3 que donne la proportionnalité rigoureuse; ce qui réduit l'erreur environ à 1/20 du résultat total. On peut considérer ces expériences comme une confirmation de la loi que la balance de torsion nous avait déjà fait connaître. (*Acad. des Sciences*, 1785, p. 581.)

Il serait facile de répéter ces expériences avec des électricités de même nature. Dans ce cas l'aiguille serait repoussée et oscillerait dans une direction tout-à-fait opposée à celle qu'elle avait dans l'expérience où les électrisés étaient de nature contraire. Coulomb. (Mém. cité, p. 586) a préféré, pour constater la loi des répulsions, faire usage de la balance décrite ci-dessus.

342. Il nous reste à découvrir dans quelle proportion chaque corps contribue à l'effet total dans la réaction mutuelle de deux corps électrisés.

Pour cela il suffit d'enlever à l'un quelconque des corps la moitié de son électricité; on y parvient en le touchant avec un corps entièrement semblable.

Supposons, par exemple, que, dans la balance de torsion, la boule fixe et la boule mobile étant électrisées et placées à la distance de 28°, la répulsion soit capable de faire équilibre à 120° + 28° ou à 148° de torsion.

Dans cet état, on touche la boule fixe avec une autre boule de même volume, de même matière et dans l'état naturel. On lui enlève nécessairement la moitié de son électricité. On détord le fil de suspension, jusqu'à ce que l'équilibre soit rétabli à la même distance de 28°; le micromètre supérieur ne répond plus qu'à 44°; le fil de suspension n'est donc plus tordu que de 44° + 28, ou de 72°.

En ajoutant à 72 la perte de 1/50 pour une minute, durée de l'expérience, on a 72 + 72/50 ou 73 1/2. Cette valeur corrigée approche tant de 74, moitié de 148, que l'erreur peut être négligée.

La même expérience, répétée plusieurs fois avec des boules, des cercles, etc., donne le même résultat. Il suit de là que l'attraction et la répulsion de deux corps électrisés à la distance D, est exprimée par $\frac{F E E'}{D^2}$; E, E' étant des constantes proportionnelles aux quantités d'électricité de chaque corps, E étant la force électrique dans le cas où les deux corps posséderaient chacun une quantité d'électricité égale à l'unité, et seraient placés à l'unité de distance.

Une remarque importante, c'est que l'égalité de partage est indépendante de la nature des boules : ainsi la boule fixe de moelle de sureau perd la moitié de son électricité aussi bien par le contact d'une boule semblable que par celui d'une boule de cuivre. De ce que le partage de l'électricité entre des corps conducteurs de même force et de même volume se fait toujours en proportions égales, quelle que soit la nature des substances, il résulte que ces corps n'ont pas d'affinité chimique pour l'électricité, ou que cette affinité est la même pour tous.

Ainsi, au même degré de tension, tous les corps (du même volume et de la même forme) possèdent la même quantité d'électricité. Ainsi la capacité électrique de tous les corps est la même, ce qui est bien différent de ce que nous a présenté la chaleur. (Voyez *Capacités*.)

Perte de l'électricité par l'air et par les supports. Lois suivant lesquelles cette perte s'effectue.

343. L'expérience apprend que l'électricité répandue sur un corps décroît et s'anéantit assez rapidement. La connaissance des lois de ce décroissement est nécessaire pour la discussion de la plupart des expériences d'électricité.

344. *Deux causes* paraissent principalement concourir à produire la perte de l'électricité. 1° On ne connaît aucune substance qui ne propage une électricité énergique. Pour s'en convaincre, on n'a qu'à former des cylindres avec les substances le moins conductrices, le verre, la cire d'Espagne, la gomme laque, on reconnaîtra que, si on les met en contact avec le conducteur d'une machine électrique, ils se chargeront de quantités d'électricité sensibles aux électroscopes; et même on pourra s'assurer que l'électricité s'est propagée sur le cylindre avec une intensité décroissante. Tous les supports qu'on emploie comme isolans doivent donc se charger d'électricité; et, s'ils sont assez courts pour en être chargés dans toute leur longueur, ils causent nécessairement une perte. La vapeur d'eau contenue dans l'air se précipite sur les supports, et en aug-

(1) En supposant que, l'intensité, au commencement de l'expérience, soit 10 elle ne sera plus que 9 à la fin; on aura donc

$$T = D\pi\sqrt{\frac{l}{10}} \text{ et } 60 = D\pi\sqrt{\frac{l}{9}};$$

d'où $T : 60 :: \sqrt{9} : \sqrt{10}$; d'où $T = 57$.

mente la faculté conductrice; il est même impossible de faire des expériences d'électricité si l'on n'a préalablement le soin de sécher les supports isolans des appareils.

2° Les corps étant enveloppés de toutes parts par l'air atmosphérique, les particules de ce fluide en contact avec le corps électrisé, se chargeant d'électricité, sont repoussées du corps et remplacées par d'autres, et ainsi de suite. Il doit donc s'établir à la surface des corps électrisés des courans d'air qui finissent par enlever toute l'électricité.

345. *Perte par l'air.* Coulomb est parvenu à isoler la perte due au contact de l'air. Après beaucoup d'essais, il a reconnu que lorsque l'énergie électrique n'est pas très considérable, un petit cylindre de cire d'Espagne ou de gomme laque, d'une demi-ligne de diamètre et de 18 à 20 lignes de longueur, suffit presque toujours pour isoler parfaitement une balle de sureau de 5 à 6 lignes de diamètre. Il a également reconnu que, pour un air sec, un fil de soie très fin, passé dans de la cire d'Espagne bouillante, et ne formant ensuite qu'un petit cylindre d'un quart de ligne, remplit aussi le même objet pourvu qu'on donne à ce fil une longueur de 5 à 6 pouces. Un fil de verre tiré à la lampe d'émailleur, de 5 à 6 pouces de longueur, n'isole la boule que dans les jours très secs, et lorsque celle-ci est chargée d'une très faible quantité d'électricité. Il en est de même d'un cheveu ou d'un fil de soie, à moins qu'ils ne soient enduits de cire d'Espagne, ou, ce qui vaut encore mieux, de gomme laque. On reconnaît que les supports isolent parfaitement, lorsque leur multiplication n'augmente pas la perte d'électricité. (*Académie des Sciences*, 1785, p. 616.)

346. Guidé par ces observations préliminaires, Coulomb suspendit une petite boule de moelle de sureau à un fil de soie très fin enduit de cire d'Espagne, terminé par un petit cylindre de gomme laque de 18 à 20 lignes, de sorte que l'isolement de cette petite boule pouvait être considéré comme parfait. Celui de la boule mobile l'était également, puisque nous avons vu, n° 338, qu'elle était portée par une aiguille de gomme laque. Le diamètre des deux boules était le même; la flexibilité du fil était tellement grande, qu'en agissant avec un levier de 4 pouces, il suffisait d'un poids de 1/340 de grain pour le tordre de 360 degrés.

Voyons l'expérience : Coulomb électrise les deux boules, au moyen d'une épingle à grosse tête; elles se repoussent jusqu'à 40 degrés de distance; il augmente la torsion de manière à les ramener à 20 degrés; supposons qu'il faille pour cela tordre le fil de 140 degrés; on note le moment où, sous ce degré de torsion, les deux boules se tiennent à la distance de 20 degrés; comme l'électricité se perd, les deux boules se rapprochent quelques minutes après l'opération; ainsi pour pouvoir les observer toujours à la première distance de 20, on détord le fil de suspension de 30 degrés (au moyen de l'index supérieur); elles se repoussent à une distance un peu supérieure à 20 degrés. On attend qu'elles soient à cette dernière distance; on tient compte du temps écoulé, que nous supposerons de trois minutes.

L'intensité au commencement de l'expérience était de 140+20 ou de 160 degrés.

Au bout de trois minutes de 110+20 ou de 130 degrés.

Elle avait donc diminué de 30 degrés pendant trois minutes, ou de 10 degrés pour une minute.

L'intensité moyenne était de $\frac{160+130}{2}$ ou de 145; ainsi la perte par minute était de 10/145 ou de 1/14,5.

Par des expériences de ce genre multipliées, Coulomb a reconnu que le rapport de la force électrique perdue à la force totale est représenté pour un même état de l'air, par une quantité constante, c'est-à-dire que *la perte de l'électricité est toujours proportionnelle à l'intensité électrique.* Ce résultat est vrai, quels que soient le volume, la nature et la figure des corps; quel que soit le rapport entre les quantités d'électricité.

Il a même armé un jour, sans rendre la perte plus grande, l'une des boules de sa balance d'un petit fil de cuivre de 10 lignes de longueur, et d'un quart de ligne de diamètre. Il est bien entendu qu'il n'est ici question que de faibles charges électriques.

D'après les mêmes expériences, on voit que la perte par l'air est d'autant plus grande que le degré de l'hygromètre est plus rapproché de l'humidité extrême.

347. *Perte par les supports.* La loi de la déperdition de l'électricité par le seul contact de l'air étant connue d'après ce qui précède, il reste à rechercher la perte opérée par les supports qui produisent un isolement imparfait.

La première idée qui s'offre à l'esprit est de faire choix de supports qui isolent assez imparfaitement pour que la perte qu'ils produisent soit très grande, comparativement à celle que produit l'air seul; mais une déperdition très rapide aurait un inconvénient grave. En effet, quand on électrise les deux boules, l'aiguille oscille pendant quelque temps; elle oscille encore quand on touche au micromètre pour diminuer ou augmenter la torsion du fil; de sorte que si la déperdition était très rapide, toute l'électricité serait anéantie avant que l'aiguille fût arrivée à l'état de repos. Il faut donc employer des isolans assez parfaits, pour que l'intensité de l'électricité n'éprouve pas de variation considérable pendant les expériences; tels sont la soie, le cheveu, le verre, etc.

Dans quelques expériences, Coulomb a suspendu la boule fixe par un simple fil de soie d'un seul brin, tel qu'il sort du cocon. Ce fil avait quinze pouces de longueur; le diamètre de la boule mobile était toujours égal à celui de la boule fixe; la première était totalement isolée. La perte se mesurait comme dans les cas précédens. Les expériences

ont été faites le même jour que celles que nous avons rapportées sur la perte due au contact de l'air; conséquemment on peut emprunter de celle-ci la perte qui aurait eu lieu sans l'imperfection des supports.

La première remarque qu'offrent ces expériences, c'est que le décroissement de l'électricité, d'abord beaucoup plus rapide que par le contact de l'air seul, lorsque l'intensité de la force répulsive des boules est un peu considérable, se ralentit graduellement, à mesure que cette intensité s'affaiblit; de sorte qu'il vient un moment où la boule suspendue par le fil de soie ne perd pas plus que lorsqu'elle est isolée complètement par un fil de gomme laque. Il résulte de là, qu'à cette limite le fil de soie de quinze pouces est un isolant parfait, et qu'il conserve cette propriété pour tous les degrés d'électricité plus faibles.

Ce fait est général, c'est-à-dire qu'il existe pour chaque isolant imparfait, une électricité qu'il isole complètement.

Plus la perte par l'air seul est considérable, plus la perte par les supports l'est aussi.

Coulomb est arrivé à cet autre résultat, savoir : que l'intensité électrique qu'un fil de soie, un cheveu, et tout corps cylindrique très fin de substances analogues, commence à isoler, est, pour le même état de l'air, *proportionnelle à la racine carrée de la longueur;* en sorte que, par exemple, si un fil de soie d'un pied de longueur commence à isoler un corps dont l'intensité électrique est A, un fil de quatre pieds pourra isoler ce corps chargé d'une intensité électrique de $2A$. (Ac. des Sc., 1785.)

Disposition de l'Électricité à la surface des corps conducteurs isolés.

348. *L'électricité se porte à la surface des corps.* Les expériences suivantes mettent ce fait hors de doute. 1° Qu'on prenne une sphère creuse de métal, à laquelle on ait pratiqué une ouverture de 2 à 3 centimètres de diamètre; qu'on la place sur un support isolant, et qu'on lui communique une certaine quantité d'électricité; et même, si l'on veut, qu'on établisse la communication entre l'intérieur et le corps électrisé. Si l'on éloigne maintenant la sphère du conducteur électrisé, pour porter dans l'intérieur une petite boule de métal, fixée à l'extrémité d'un long fil de gomme laque, on verra, en retirant cette boule, et en la présentant à un pendule, qu'elle n'est pas chargée de la plus faible quantité d'électricité. Si, au contraire, on touche la surface extérieure avec la même boule, elle prendra assez d'électricité pour faire mouvoir le pendule; et, si l'on a électrisé d'avance ce dernier, on reconnaîtra que la sphère avait la même électricité que le conducteur.

Quand on répète cette expérience, il faut avoir l'attention d'introduire dans la sphère et d'en retirer le plus promptement possible la boule métallique, en la faisant passer par le milieu de l'ouverture, pour l'empêcher d'enlever quelque portion d'électricité accumulée sur ses bords. On trouve quelquefois que la boule présente de faibles signes d'une électricité de nature *contraire* à celle de la sphère, et qui ne disparaît même point par le contact des corps conducteurs. Cette électricité n'appartient pas en propre à la boule, mais elle lui est communiquée par la gomme laque, qui la lui rend à mesure qu'on l'enlève. Nous verrons plus loin comment la gomme laque peut prendre à distance une électricité contraire à celle de la sphère.

2° Deux sphères conductrices, de même rayon, sont électrisées ensemble et ensuite séparées; elles contiennent évidemment chacune la même quantité d'électricité; maintenant qu'on touche l'une avec une sphère métallique massive, et l'autre avec une sphère métallique creuse, on enlèvera à chacune la même quantité d'électricité, et l'électricité de chacune des deux premières sphères sera réduite à moitié, comme on le reconnaîtra à l'aide du plan d'épreuve. (*Voyez* plus loin.)

3° On rend encore sensible, par une expérience curieuse, la tendance de l'électricité à se porter à la surface des corps. Soit MN (*fig.* 217) un cylindre conducteur isolé, mobile autour d'un axe horizontal; sur ce cylindre est enroulé un ruban métallique, à l'extrémité duquel est attaché un cordon de soie. Cet appareil communique à un électroscope sensible E, composé de deux fils métalliques garnis de boules de moelle de sureau. Si l'on électrise le cylindre et le ruban, aussitôt les deux boules divergent. Alors on déroule le ruban en le tirant par un cordon de soie D; on voit les fils se rapprocher, et indiquer l'affaiblissement progressif de l'intensité électrique. L'écart des boules pourrait même devenir insensible, si le ruban était assez long, comparativement à la charge électrique de l'appareil. La divergence a lieu de nouveau, si l'on enroule de nouveau le ruban sur le cylindre. Alors, si l'air est très sec, la réaction des fils redevient à peu près la même qu'au commencement.

Il résulte de ces expériences, très faciles à varier, que l'électricité se porte à la surface des corps conducteurs, et ne réside nullement dans leur intérieur. L'expérience nous a encore appris qu'elle n'est retenue à cette surface que par la pression de l'air, et que c'est là le seul obstacle qui l'empêche de quitter ces corps (n° 333, 7°).

349. Lorsque le corps conducteur est une sphère, la seule raison de symétrie veut que l'épaisseur de la couche électrique soit la même sur tous les points; ce qui est en effet conforme à l'expérience.

Nous ferons remarquer que lorsqu'on a accumulé sur une sphère des quantités d'électricité de plus en plus grandes, il est indifférent pour les expériences que les nouvelles couches se disposent sous les premières, et augmentent l'épaisseur, ou

bien que, l'épaisseur restant la même, la densité de l'électricité augmente en chaque point. Nous reviendrons plus loin sur cette remarque.

350. *Procédé pour rechercher la distribution de l'électricité sur les corps de formes diverses.* Un petit disque métallique, isolé par un fil de gomme laque, peut très bien servir pour cet objet. Il fera connaître non seulement la nature de l'électricité, mais encore la quantité absolue qui s'en trouve répandue sur chaque partie du corps. A cet effet, on le fait toucher un point du corps, puis on le présente au disque mobile de la balance électrique, que l'on a préalablement chargé d'une certaine quantité d'électricité de même nature. La réaction du petit plan sera proportionnelle à sa charge, n° 342; et, si l'on répète cette épreuve pour un point différent du corps, mais sans rien changer à la première charge du disque mobile, il est visible que les torsions nécessaires pour ramener les deux disques à une même distance donneront les rapports des charges du plan d'épreuve (1). Il faut voir maintenant si un petit plan, appliqué sur un corps électrisé, lui enlève une quantité d'électricité proportionnelle à l'intensité de l'élément qu'il touche. Voici comment on s'en assure :

1° Soit un cylindre conducteur, isolé et chargé d'une certaine quantité d'électricité. Supposons que la longueur de ce cylindre en surpasse beaucoup la largeur, qu'on porte le plan d'épreuve au milieu de sa longueur, et ensuite à une de ses extrémités, on trouvera deux quantités très différentes; maintenant qu'on fasse toucher le cylindre par un autre, de nature, de forme et de dimension exactement pareilles, également isolé, le partage se fera certainement d'une manière égale entre les deux corps. Le premier conducteur ne conservera donc que la moitié de son électricité. Si l'on reporte le plan d'épreuve sur les deux mêmes points, on trouvera que les réactions électriques sont réduites exactement à la moitié de ce qu'elles étaient d'abord. On suppose ici nulle la perte par l'air et par les supports; on peut d'ailleurs tenir compte de la perte qui aurait lieu.

(1) En effet, on sait (n° 342) que la réaction électrique de deux corps électrisés est $\frac{FEE'}{D^2}$; E, la charge du disque mobile, et D la distance des deux disques, sont constantes; il n'y a que la charge du disque d'épreuve qui varie; et comme $\frac{FEE'}{D^2}$ fait équilibre à la torsion dans le premier cas, et $\frac{FEE''}{D^2}$ dans le second, on a, si m et m' sont les nombres de degrés de torsion nécessaires pour établir l'équilibre, $E' : E'' :: m : m'$. Et comme de plus E' et E'' sont proportionnelles aux intensités des points touchés, on a le rapport exact de ces intensités.

2° On place sur un isoloir un corps de figure quelconque, et on l'électrise. On le touche en un point déterminé b avec le plan d'épreuve; on porte ce plan dans la balance; on opère comme à la page précédente, soit B la torsion correspondante à la distance D.

On retire le plan d'épreuve, et on lui fait toucher un point b', différent du premier. Soit mB la torsion; le rapport avec la première est m.

Si après quelques minutes, on répète la même expérience, en portant toujours le petit plan sur les points b et b', on ne trouve plus les mêmes torsions absolues, à cause de la déperdition de l'électricité; mais le rapport reste toujours le même. De sorte que si la première est B', la seconde devient mB'; il faut nécessairement, pour que la comparaison soit exacte, mettre entre les deux contacts successifs le même intervalle de temps que dans la première expérience, sans quoi la perte de l'électricité ne serait pas proportionnellement la même.

On pourra répéter ces épreuves autant de fois qu'on le voudra, et la proportionnalité des torsions se maintiendra tant qu'il restera de l'électricité sur le corps conducteur.

Si l'on a noté les époques des observations successives, on voit que l'affaiblissement absolu est précisément tel qu'il doit résulter du seul contact de l'air; c'est-à-dire que la répulsion du plan et de la boule mobile, à une époque quelconque, est absolument la même que si l'on avait mis le plan mobile dans la balance avec la charge primitive d'électricité qu'il avait acquise au point b ou b'. Il ne s'agit ici que de charges faibles, les seules qui puissent être soumises à ces épreuves.

Il est donc bien démontré par ces expériences que le plan d'épreuve prend des quantités absolues d'électricité proportionnelles à la quantité totale de l'électricité répandue sur la surface des corps, au moment du contact; et quelle que soit cette somme, les quantités prises au même moment sur différens points de la surface, sont entre elles dans un rapport invariable; de là résulte cette conséquence : *l'intensité de l'électricité de chaque point d'une surface s'accroît ou décroît dans le même rapport que la quantité totale d'électricité répandue sur toute la surface.*

Dans les expériences de ce genre, il est inutile de tenir compte de la quantité d'électricité enlevée par le plan d'épreuve, parce qu'elle est infiniment petite, comparativement à celle qui est répandue sur la surface totale du corps.

La perte de l'électricité est toujours plus ou moins grande; il faut nécessairement y avoir égard. C'est ce qu'on peut faire, d'après ce qui précède (n° 343). Mais il vaut encore mieux suppléer à cette correction, en combinant les expériences de manière qu'elles se rectifient elles-mêmes. Supposons, par exemple, qu'il s'agisse de comparer les intensités de deux points a et b : on fera d'abord toucher le point a par le petit plan, puis on obser-

vera la réaction proportionnelle qui en résulte dans celui-ci. Ensuite on en fera de même au point *b*, et l'on observera la réaction correspondante. Alors, si entre deux observations il s'est écoulé un certain temps, par exemple trois minutes, on attendra trois minutes, et l'on répétera le contact de *a*; en prenant une moyenne arithmétique entre ce dernier résultat et le premier, on aura des résultats dont le rapport sera le même que si la déperdition de l'électricité eût été nulle. Ce mode de correction, qui s'opère par des observations correspondantes, est excellent; il est simple, et n'exige que des balances d'un petit volume. (*Académie*, 1787, p. 425.) On l'emploie souvent dans les recherches de physique.

351. Coulomb a cherché *le rapport entre la quantité d'électricité que prend le plan d'épreuve, et celle qui se trouve sur l'élément de la surface qu'il touche*. Pour cela, il a placé sur un isoloir un globe de 8 pouces de diamètre, et il l'a électrisé positivement ainsi que la boule mobile de la balance; il l'a ensuite touché avec un globe d'un pouce de diamètre, et il a porté ce petit globe dans la balance; il a fallu une torsion de 144 degrés pour faire équilibre à la force répulsive à une distance fixe.

Il a fait ensuite toucher le gros globe par un plan circulaire isolé, de 16 pouces de diamètre, et il a répété l'expérience du petit globe. Cette fois il a suffi d'une torsion de 47 degrés pour faire équilibre à la force répulsive.

Pour bien analyser cette expérience, il faut considérer que les deux globes, ayant des figures tout-à-fait semblables, et se touchant tout-à-fait de la même manière, le partage de l'électricité a dû toujours se faire dans un rapport dépendant seulement de celui de leurs surfaces. Les réactions électriques du grand globe dans les deux expériences ont donc dû être proportionnelles à celles du petit globe, ou à 144 et à 47. Et, d'après ce que nous savons sur les formes sphériques, ces nombres peuvent être considérés comme étant dans le rapport des quantités d'électricité répandue sur le grand globe aux deux époques. Ainsi le globe a perdu, par le contact du plan 144 — 47, ou 97, ce qui est double à peu près de ce qu'il a conservé. Or, la surface d'un globe de 8 pouces de diamètre est égale à $4\pi 4^2$; celle d'un plan circulaire de 16 pouces de diamètre est égale à $2\pi 8^2$, c'est-à-dire double de celle du globe. D'après cela, il paraît que dans le contact tangentiel d'un globe et d'un plan, le partage de l'électricité se fait à peu près proportionnellement aux deux surfaces. D'autres expériences de Coulomb montrent que ce rapport est d'autant plus exact que le plan est plus petit. Ainsi le plan d'épreuve prend une quantité d'électricité double de celle de l'élément qu'il touche; et quand on le rapportera dans la balance, vu sa petitesse, son action sur l'aiguille électrisée de la même manière sera la même que celle d'un seul point chargé de la même quantité d'électricité. La torsion du fil lui sera donc proportionnelle, et par suite proportionnelle à l'intensité électrique de l'élément que le plan a touché. On voit donc comment les torsions peuvent donner les rapports d'intensité électrique des différens points d'un corps.

352. Il convient de porter son attention sur la qualité de la gomme laque. Celle qui a une couleur sombre paraît la meilleure; il faut cependant la soumettre à quelques épreuves : par exemple, on peut la tirer en fils et présenter ces fils à un conducteur électrisé; s'ils s'imprègnent d'électricité, il faut les rejeter, et n'admettre que ceux dont l'imperméabilité est complète.

353. *Résultats*. Nous rapporterons plusieurs expériences de Coulomb, dans lesquelles ce célèbre physicien a employé la méthode que nous venons de décrire.

Il chercha d'abord la distribution de l'électricité sur une lame d'acier de 11 pouces de longueur, de 1 pouce de largeur et de 1/2 ligne d'épaisseur; afin de pouvoir la toucher dans toute sa largeur, il donna au plan d'épreuve un pouce de longueur sur trois lignes de largeur.

L'intensité électrique comparée successivement à celle des points situés à un pouce de l'extrémité, à l'extrémité et au bord, fournit les rapports 1 : 1,2... 1 : 2...2 : 4.

Ainsi du milieu à un pouce du bord, l'intensité électrique est sensiblement *constante*; du milieu à l'extrémité elle croît dans le rapport de 1 à 2; enfin, quand le plan d'épreuve est appliqué sur le tranchant de la lame, il donne une intensité *quadruple* de celle du milieu.

Une autre lame de 22 pouces de longueur, et de mêmes dimensions que la précédente dans tout le reste, a donné exactement le même rapport entre le milieu et les extrémités.

Coulomb conclut de là, qu'au delà d'une certaine longueur, suffisante pour que l'intensité de l'électricité soit sensiblement uniforme dans une grande partie de la surface, un *nouvel accroissement dans la longueur n'a plus d'influence* sur le rapport des quantités d'électricité accumulées aux extrémités et au milieu, la seconde étant la moitié de la première.

L'accroissement rapide de l'électricité vers les extrémités des lames ne leur est pas particulier; il s'observe en général dans les corps prismatiques ou cylindriques; il est d'autant plus rapide qu'ils sont plus minces.

Coulomb a fait des expériences semblables aux précédentes avec un cylindre de 30 pouces de longueur, et de 2 pouces de diamètre, terminés par deux demi-sphères.

	Rapport.
Résultats. Au milieu et à 2 pouces de l'extrémité,	1 : 1,25
Au milieu et à 1 pouce de l'extrémité,	1 : 1,80
Au milieu et à l'extrémité,	1 : 2,30

Il a trouvé que pour des cylindres très amincis vers leurs extrémités, l'accroissement est beaucoup plus rapide, et si l'extrémité s'allonge en pointe, l'intensité augmente à tel point, que la résistance de l'air ne suffit plus pour la retenir. Nous reviendrons sur ce sujet à l'article des paratonnerres.

Expérience faite avec un plateau de 10 pouces de diamètre.

		Intensités électriques.
Au centre		1
A un pouce du centre		1,001
A 2	*id.*	1,005
A 3	*id.*	1,170
A 4	*id.*	1,52
A 4,5	*id.*	2,07
A 5	*id.*	2,90

La même expérience a été répétée avec des plateaux circulaires différens, et il a été reconnu comme pour les lames, qu'au delà d'une certaine étendue la loi des intensités vers les bords devient la même.

Ces exemples suffisent pour donner une idée de la distribution de l'électricité sur les corps.

Distribution du fluide électrique entre plusieurs corps en contact.

354. Coulomb a fait un grand nombre de recherches sur ce sujet. Nous ne rapporterons ici que celles qui sont relatives aux cas les plus simples. Nous verrons ensuite que les résultats de l'expérience sont d'accord avec la théorie.

Soient d'abord deux sphères égales, chargées d'une même espèce d'électricité (*fig.* 219), l'électricité est insensible du point de contact jusqu'à 20 degrés.

De 30° en C à 90 en D, l'intensité électrique augmente dans le rapport de 208 à 1000.

De 60° en B à 90° en D, l'augmentation se fait dans le rapport de 799 à 1000.

Enfin, de 90 à 180, l'accroissement est à peu près insensible, puisqu'il a lieu dans le rapport de 1000 à 1058.

Résultats obtenus avec deux globes inégaux, dont l'un avait un diamètre double de celui de l'autre.

355. (Petite sphère). Du point de contact M à 30° en C (*fig.* 220), électricité insensible; de 60° en B, à 90° en D, rapport de 588 à 1000; de 90° en D, à 180° en A, rapport de 1000 à 1323.

L'intensité sur le petit globe au point D est à l'intensité au point D' sur le grand globe, dans le rapport 1,25 à 1. M. Poisson a obtenu par le calcul, 1,24. Coulomb a trouvé que, le petit globe diminuant de plus en plus de volume, le rapport entre l'intensité électrique au point A, et celle au point opposé A', avait pour limite 4 plus une fraction. Le calcul a fourni 4,2 à M. Poisson.

Si l'on sépare les deux sphères, et qu'on les mette à une distance telle qu'elles n'aient aucune influence l'une sur l'autre, la tension sur la plus petite l'emporte sur celle de la plus grande, et elle tend vers une limite qui est 5/3. (M. Poisson.)

Si l'on écarte les deux sphères à une distance assez petite pour qu'elles restent soumises à leur influence mutuelle, la plus petite prend, sur la partie la plus voisine de la plus grande, une électricité contraire à celle dont les deux sphères étaient chargées. Quand la distance est égale au demi-rayon de la plus grande, l'électricité contraire disparaît, et chaque sphère ne se trouve chargée que de l'électricité commune. (M. Poisson.)

Résultats obtenus avec douze globes de 2 pouces de diamètre.

356. Les globes placés à égale distance du milieu sont également chargés d'électricité.

L'intensité du globe extrême est à l'intensité du globe suivant comme 1,50 est à 1,00, et à l'intensité du globe du milieu comme 1,75 est à 1,00.

La disposition de l'électricité sur un cylindre est peu différente de ce qu'elle se trouve sur une suite de globes égaux.

357. Coulomb a encore cherché la manière dont se fait le partage entre un globe de 8 pouces de diamètre et des cylindres différens en épaisseur, mais de même longueur : il a trouvé,

L'intensité sur le globe étant 1,00;

L'intensité sur un cylindre de deux pouces de diamètre et de 30 pouces de longueur, est 1,30;

Sur un cylindre d'un pouce de diamètre, 2,00;

Sur un cylindre de deux lignes de diamètre, 9,00.

Il suit de ces expériences que l'intensité électrique sur un cylindre en contact avec un globe sera d'autant plus grande que le diamètre du cylindre sera plus petit. Et, enfin, cette intensité pourra s'accroître au point de vaincre la résistance de l'air; ce résultat fait concevoir le pouvoir des pointes pour lancer le fluide électrique. (*Acad. des Sciences*, 1718.)

358. M. Poisson a soumis à l'analyse la distribution du fluide électrique à la surface des corps.

D'après ce travail, le fluide électrique doit se tenir à la surface des corps, et n'y former qu'une couche extrêmement mince. La surface extérieure de la couche électrique est la même que celle des corps. La surface intérieure est nécessairement peu

différente de la première, puisque la couche électrique est très mince.

Il est visible que, pour que le corps demeure dans un état permanent, la forme de la surface doit être telle que la couche entière n'exerce ni attraction ni répulsion sur les points placés dans sa concavité. C'est cette condition analytique qui détermine en général la forme et l'épaisseur de la couche; l'épaisseur est, en général, inégale.

Sur une sphère, elle est constante. On démontre en effet qu'une semblable couche, dans la loi du carré des distances, n'exerce aucune action sur les points de son intérieur.

Sur un ellipsoïde, l'épaisseur de la couche électrique est variable; les épaisseurs qui répondent aux sommets des deux axes sont entre elles comme les longueurs de ces axes.

Un des résultats de l'analyse est que la pression exercée en un point contre l'air est en raison composée de la force répulsive des molécules et de l'épaisseur de la couche en ce point; et comme chacun de ces deux élémens est proportionnel à l'autre, il en résulte que la pression exercée contre l'air est proportionnelle au carré de l'épaisseur de la couche électrique.

Tous les résultats auxquels l'analyse a conduit M. Poisson, et qui sont de nature à pouvoir être soumis à l'épreuve de l'expérience, ont été pleinement confirmés, et particulièrement par les expériences de Coulomb.

M. Poisson s'est encore occupé de la distribution du fluide sur plusieurs corps électrisés, soumis à leur influence mutuelle. La disposition de l'électricité est assujétie à un principe général, qui a l'avantage de ramener toutes les questions de ce genre à une condition mathématique. En voici l'énoncé :

« Si plusieurs corps conducteurs électrisés sont mis en présence les uns des autres, et qu'ils parviennent à un état électrique permanent, il faudra, dans cet état, que la résultante des actions des couches électriques qui les recouvrent sur un point quelconque pris dans l'intérieur d'un de ces corps, soit nulle : car si cette résultante n'était pas nulle, l'électricité combinée qui réside au point que l'on considère, serait décomposée, et l'état électrique changerait contre la supposition que l'on a faite de sa permanence. »

Ce principe évident de lui-même, traduit en calcul, fournit autant d'équations que la question présente d'inconnues. La résolution de ces équations surpasse souvent les ressources de l'analyse. Nous renverrons pour plus de développemens au mémoire original (*Mém. de l'Institut*, 1811) les personnes exercées à l'analyse.

DES MACHINES ÉLECTRIQUES.

359. Pour agrandir les effets électriques, il faut opérer le frottement sur de grandes surfaces; c'est à cet usage que sont destinées les machines électriques. Dans la machine électrique employée aujourd'hui l'électricité est produite par le frottement qu'exercent plusieurs coussins remplis de crin, sur les deux surfaces d'un plateau en verre; ce plateau est maintenu dans une position verticale, et fixé à un axe auquel on imprime un mouvement de rotation (*fig* 205 *bis*). On applique sur les coussins, préalablement recouverts d'une matière grasse, de l'or mussif (deutosulfure d'étain), ou un amalgame d'étain et de mercure, ou enfin un alliage triple de 1 partie d'étain, de 2 p. de zinc, et de 4 p. de mercure. Ce sont là les substances que l'expérience a indiquées, comme les plus propres à favoriser le développement de l'électricité.

L'électricité, à mesure qu'elle est développée, est attirée par les pointes métalliques, situées horizontalement à une petite distance du plateau de verre; ces pointes font partie d'un cylindre en cuivre auquel on donne le nom de conducteur, et qui a ordinairement la forme d'un fer à cheval. Il faut qu'il ait autant de branches qu'il y a de coussins, afin que le plateau, quand il arrive sur un frottoir, soit complètement déchargé. Il convient encore que les pointes soient placées de manière à décharger le plateau de chaque côté. Comme ces pointes augmentent la perte du conducteur, peut-être serait il mieux de les remplacer par de petites boules.

Le conducteur de la machine électrique est nécessairement isolé; on le fait reposer sur des bâtons de verre longs et enduits de cire d'Espagne, ou, mieux encore, de gomme laque.

Tout est disposé de manière à rendre le frottement étendu et durable. En effet, les coussins s'appliquent aisément sur la surface du verre, par le moyen d'un ressort qui tend à rapprocher les deux montans en bois auxquels ils sont attachés. Dans cette machine, les coussins se chargent d'électricité négative et le plateau d'électricité positive. Il est nécessaire de faire communiquer les premiers avec le sol, par le moyen d'une chaîne métallique; sans cette précaution, les effets produits par la machine seraient faibles. Les coussins restant chargés d'électricité négative, il ne se développerait plus de nouvelle électricité, passé un certain terme. Car, supposons qu'elle soit capable de vaincre la résistance de l'air, le plateau en verre ne se chargerait plus que de la quantité d'électricité positive correspondante à la quantité d'électricité négative, qui pourrait se dissiper ainsi.

On peut rendre cela sensible d'une autre manière : Représentons par $+e$ la quantité d'électricité positive répandue sur le plateau, et par $-e$ la quantité correspondante d'électricité négative répandue sur les coussins. Cette électricité négative attire l'électricité positive répandue sur le verre, et doit nécessairement diminuer celle dont se charge ce dernier. Supposons maintenant qu'on communique $+2e$ au système des deux corps, c'est-à-dire $+e$ à chaque corps, $+e$ sera neutralisé par $-e$ des coussins, et

verra le pendule s'éloigner peu à peu, et enfin reprendre sa position verticale au moment du contact des deux disques.

Voici encore une expérience qui vient à l'appui des précédentes.

Deux plateaux métalliques *A* et *B* (*fig.* 222), fixés sur des pieds isolans, peuvent être rapprochés ou éloignés. A chaque plateau est attaché un petit pendule. Pendant qu'ils sont tenus à distance, on donne au plateau *A* une certaine quantité d'électricité positive ou négative. Supposons que ce soit cette dernière; elle décomposera l'électricité naturelle du plateau *B*, attirera l'électricité positive, et repoussera la négative. Les deux pendules seront déviés de la verticale. Si l'on touche le plateau *B*, l'électricité négative, qui est repoussée par l'électricité négative du plateau *A*, passera dans le sol. Si l'on éloigne les plateaux, la répulsion des pendules augmentera, elle diminuera par le rapprochement des plateaux, enfin elle disparaîtra sensiblement si on les met en contact.

Ces notions générales établies, il sera très facile de comprendre la théorie de l'électrophore, des condensateurs et de la plupart des instrumens fondés sur les propriétés de l'électricité.

369. *De l'Électrophore.* L'électrophore a été imaginé par Wilcke, savant suédois. Cet instrument est composé d'un gâteau de matière résineuse, bien uni, sur lequel on place un plateau de métal, garni d'un manche de verre (*fig.* 223).

On frappe ou l'on frotte d'abord le gâteau de résine avec une peau de chat; ensuite on place le plateau métallique sur la résine : l'électricité négative, développée sur celle-ci, décompose le fluide naturel du métal, attire l'électricité positive, et repousse l'électricité négative. Si donc l'on touche avec le doigt le plateau métallique, l'électricité négative est chassée dans le sol, tandis que l'électricité positive est retenue par l'électricité négative de la résine; et, à cause de l'imperméabilité de cette dernière, la combinaison ne peut s'opérer. Il résulte de là que, si l'on enlève d'abord le doigt, puis le plateau métallique, en le tenant par le manche isolant, on le trouve chargé d'électricité positive, et il donne une forte étincelle à l'approche d'un corps conducteur. Le gâteau de résine conservant toute son électricité, cette expérience peut se répéter un grand nombre de fois : de là la dénomination d'*électrophore* ou porteur d'électricité.

Souvent l'expérience précédente ne réussit pas complètement, surtout dans les temps humides : alors l'électricité se perd à mesure qu'elle se développe. C'est pourquoi, lorsqu'on veut se servir de l'électrophore, on a soin d'en sécher toutes les parties.

La résine est quelquefois renfermée dans une enveloppe en tôle, dont l'électricité est décomposée par celle de la résine; de manière que l'électricité négative est chassée dans le sol, et l'électricité positive est retenue. Si maintenant on approche le plateau métallique, et qu'on le touche avec le doigt pour qu'il communique avec le sol, l'électricité positive de l'enveloppe agit par répulsion sur l'électricité positive du plateau métallique, et elle est repoussée elle-même; de sorte que si l'on touche l'enveloppe, que nous supposons isolée, une portion d'électricité positive passe dans le sol, et l'on a le maximum de charge.

L'électrophore est d'un emploi fréquent dans les laboratoires de chimie. Veut-on enflammer un mélange détonant, par exemple un mélange d'air et d'hydrogène renfermé dans un eudiomètre (*fig.* 224), on touche le bouton *a* avec le plateau métallique électrisé; l'étincelle électrique passe à travers le mélange et l'enflamme; c'est une petite machine électrique fort commode, puisqu'il suffit de frotter de temps à autre le gâteau de résine pour se procurer de fortes étincelles.

370. La lampe électrique est une application de l'électrophore (*fig.* 225).

Cette lampe se compose d'un vase en verre, en partie plein d'acide sulfurique étendu d'environ quinze parties d'eau; un cylindre de zinc *P* y est suspendu à un fil de platine. D'abord le zinc plonge dans le liquide; le gaz hydrogène se développe; on le laisse dégager par le robinet *B*, qu'on ouvre à dessein. Au bout d'un certain temps de dégagement, il n'y a plus d'air; on ferme le robinet, le gaz hydrogène continuant à se dégager, fait monter le liquide dans la partie supérieure *O*, de sorte que bientôt, le métal se trouvant hors du contact de l'acide, le dégagement cesse complètement. Le gaz comprimé par la colonne de liquide *A B*, s'échappe par la première issue qu'on lui offre. Un électrophore placé dans la partie inférieure *C D* de l'appareil est disposé de manière qu'en même temps qu'on ouvre le robinet, on soulève le plateau métallique qui est alors isolé; une tige de métal en communication avec ce plateau lance sur une tige voisine, communiquant avec le sol, une étincelle électrique, à travers le mélange d'air et d'hydrogène; ce dernier s'enflamme et brûle pendant tout le temps qu'il se dégage; on peut se servir de cette lampe pour enflammer une bougie, etc. Il faut remarquer qu'une petite bande d'étain placée sur un point du gâteau de résine permet à l'électricité négative du plateau métallique de passer dans le sol.

On fabrique aujourd'hui des lampes électriques, auxquelles on donne une forme très élégante.

371. *Des Condensateurs.* La bouteille de Leyde, la batterie, et le condensateur proprement dit, sont des instrumens dans lesquels on accumule l'électricité, et qui conséquemment peuvent être appelés condensateurs.

En 1781 Volta fit connaître un nouvel instrument; cet instrument est destiné à réunir de très petites quantités d'électricité. Il est formé d'un plateau métallique, et d'un plateau d'une substance qui tient le milieu entre les mauvais et les bons

conducteurs, par exemple, de marbre (*fig.* 229). Supposons donc que l'on fournisse au disque métallique placé sur un plateau de cette substance, une faible quantité d'électricité négative; celle-ci décomposera l'électricité naturelle du plateau de marbre, en attirera l'électricité positive et en repoussera l'électricité négative. Le marbre agira à son tour sur l'électricité négative du plateau, et en neutralisera la force répulsive, de sorte qu'on pourra fournir au plateau métallique une nouvelle portion d'électricité négative, qui décomposera une nouvelle portion du fluide naturel du marbre, et ainsi de suite. On voit donc qu'on accumule ainsi dans le plateau métallique de petites quantités d'électricité négative. Et si ensuite on l'enlève, il donne une étincelle à l'approche du doigt; on pourra déterminer la nature de l'électricité. Le marbre est assez bon conducteur pour permettre à son électricité naturelle de se décomposer sous l'influence de la faible quantité d'électricité que reçoit le plateau métallique; mais il ne l'est pas assez pour que son électricité se réunisse à celle du plateau métallique.

C'est à l'aide de cet instrument que Lavoisier et Laplace, de concert avec Volta, ont découvert qu'il se développe de l'électricité dans les actions chimiques. (Voyez le *Galvanisme*.)

372. Cet instrument a peu d'importance depuis l'invention de l'électromètre condensateur et du multiplicateur. Le condensateur dont nous allons nous occuper diffère tout-à-fait du précédent. Il consiste en deux plateaux métalliques semblables au plateau supérieur de l'électrophore, et séparés l'un de l'autre par une lame d'une substance non conductrice.

Dans le condensateur ordinaire (*fig.* 230), la lame de séparation est en verre; on la suppose bien sèche. Pour rendre commode l'usage de cet instrument, on donne au plateau inférieur un pied solide *B*, surmonté d'un bâton de verre, recouvert d'une couche de gomme laque. Veut-on charger ce condensateur, on pose sur le plateau inférieur la lame de verre *LL'*, et sur cette lame le second plateau; au moyen de tiges ou de chaînes métalliques, on établit la communication entre le plateau inférieur et le réservoir commun, puis entre le plateau supérieur et le conducteur d'une machine électrique. Le plateau supérieur est appelé plateau collecteur, parce qu'il est destiné à recevoir toute l'électricité de la machine électrique. Pour fixer les idées, supposons que le conducteur de celle-ci soit chargé d'électricité positive. Cette électricité se répand d'abord également sur le conducteur et sur le plateau supérieur du condensateur. Cette électricité positive décompose par influence l'électricité naturelle du plateau inférieur, attire l'électricité négative à la surface de ce plateau en contact avec la lame de séparation, et repousse dans la partie opposée l'électricité positive qui se dissipe dans le sol par le moyen de la chaîne de communication. Alors l'électricité positive du plateau collecteur qui attire l'électricité négative est également attirée par cette dernière, et ces deux électricités, se neutralisant en partie l'une l'autre, l'équilibre est détruit entre le collecteur et le conducteur de la machine. L'électricité positive que cette machine développe continuellement peut donc s'écouler dans le plateau supérieur; décomposer de nouvelles portions de l'électricité naturelle du plateau inférieur, en chasser dans le sol l'électricité positive et attirer toujours l'électricité négative. On voit donc qu'il se condense sur chacun des deux plateaux de grandes quantités d'électricité. De sorte qu'après un certain temps, en faisant communiquer par un excitateur le plateau inférieur avec le plateau supérieur, on verra ces deux électricités, qui sont de nature contraire, se précipiter l'une vers l'autre pour former l'électricité naturelle, et par leur réunion produire une forte étincelle.

La communication entre le sol et le plateau inférieur est absolument nécessaire; sans cette communication, l'électricité positive du plateau inférieur retiendrait l'électricité négative de ce plateau, et repousserait l'électricité positive du plateau supérieur. En sorte qu'on ne pourrait charger le condensateur, ou du moins on ne le chargerait que très faiblement, ce qu'on vérifie par l'expérience.

Comme l'électricité positive du plateau supérieur n'agit qu'à distance sur l'électricité négative du plateau inférieur, elle est plus grande (nº 338) que celle de nature contraire qu'elle retient sur le plateau inférieur; c'est-à-dire que si l'on combine ensemble ces deux quantités d'électricités différentes, il y aura un *excès d'électricité positive*. On le reconnaît en approchant un petit pendule successivement de chacun des deux plateaux séparés après la charge.

La charge du condensateur est arrivée à la *limite* quand la tension du plateau collecteur est égale à la tension qu'aurait ce plateau à saturation, s'il était simplement en communication avec le conducteur de la machine, c'est-à-dire s'il ne faisait pas partie du condensateur. En effet, l'excès qui correspond à cette tension n'étant pas attiré par l'électricité négative du plateau inférieur, est totalement libre, et n'est maintenu sur le plateau collecteur que par la pression atmosphérique. A la limite, toute l'électricité fournie au plateau supérieur se dissipe dans l'air. D'après cela, la charge limite d'un condensateur est *indépendante* de la grandeur de la machine électrique, et doit être la même avec toutes les machines qui auront *la même tension*.

Une grande quantité d'électricité se trouve sur *les faces de la lame de séparation*. Pour le démontrer, on isole l'instrument après l'avoir chargé, c'est-à-dire qu'on détruit la communication du plateau inférieur avec le sol, et celle du plateau supérieur avec le conducteur de la machine. On enlève ensuite le plateau supérieur, et on le met

dans l'état naturel, puis on enlève la lame de verre en la tenant par le bord, et on met également le plateau inférieur dans l'état naturel. Après quoi, on replace chaque partie, et le condensateur se trouve encore chargé presque autant que si l'on n'avait pas enlevé les armures. Une partie même de l'électricité *pénètre* dans le verre, puisqu'on peut obtenir plusieurs décharges par la réunion successive des deux plateaux.

373. On appelle *force condensante* du condensateur le rapport qui existe entre la quantité d'électricité du plateau collecteur à la limite, quand il fait partie du condensateur, et celle qui s'y trouverait, s'il était isolé. Représentons par V la quantité d'électricité positive du plateau collecteur à la limite, et par R la quantité d'électricité négative retenue sur le plateau inférieur par l'influence de V. Nous avons vu que l'on a $V > R$, c'est-à-dire que V est plus que suffisant pour neutraliser complètement R. Donc, R ne retient qu'une partie de V; et, si l'on touche le collecteur avec le doigt, on devra nécessairement en tirer une étincelle, ce qui arrive en effet. Soit V' la quantité d'électricité positive qui reste après ce contact : $V - V'$ sera évidemment la quantité d'électricité que l'on a enlevée, et par conséquent, celle qui n'était retenue sur le plateau supérieur que par la pression atmosphérique. Mais il est clair que cette dernière n'est autre chose que celle que prendrait ce plateau s'il ne faisait pas partie du condensateur. Donc, d'après la définition, $\frac{V}{V - V'}$ mesure la force condensante. Dans cette valeur, V' est inconnu. Pour le déterminer, posons $\frac{R}{V} = m$ (m étant nécessairement une fraction). De cette équation on tire $R = m\ V$. Or, le rapport de R à V ne dépend que de la distance des deux plateaux qui reste constante, on aura donc aussi $\frac{V'}{R} = m$. d'où l'on tire $V' = m\ R = m^2\ V$. Donc, la force condensante est représentée par $\frac{V}{V - m^2\ V}$, ce qui revient à $\frac{1}{1 - m}$.

D'où l'on voit que pour calculer la force condensante du condensateur, il suffit de connaître m ou le rapport de R à V. Pour cela, on charge le condensateur de manière à ce que, les deux plateaux étant séparés l'un de l'autre, la tension ne soit pas assez forte pour qu'il s'échappe de l'électricité dans l'air. Cela fait, après avoir opéré la séparation des deux plateaux, on cherche, d'après le procédé ci-avant décrit, n° 350, l'intensité électrique de deux points symétriquement placés sur chaque plateau. Soit a le nombre de degrés de torsion observé pour le plateau supérieur, a' le nombre correspondant pour le second, $\frac{a'}{a}$ sera égal à $\frac{R}{V}$. En effet, $\frac{a'}{a}$ représente le rapport des quantités d'électricité contenues dans deux portions égales; or, ces quantités sont proportionnelles à R et V : car, les deux plateaux étant égaux entre eux, et conséquemment composés d'un même nombre de points symétriquement placés, les quantités d'électricité contenues sur deux de ces points sont proportionnelles aux quantités totales.

374. Puisque l'électricité positive du plateau collecteur est plus que suffisante pour neutraliser l'électricité négative du plateau inférieur, il doit rester après la décharge une certaine quantité d'électricité positive sur les armures, l'instrument étant isolé (1), ce qu'on vérifie par l'expérience.

375. Nous avons vu tout à l'heure que V est plus que suffisant pour neutraliser R, ce qui nous a fait conclure avec raison qu'en présentant le doigt au plateau collecteur, l'instrument étant d'ailleurs parfaitement isolé, on doit en tirer une étincelle; cette étincelle une fois produite, il reste une quantité V' d'électricité positive sur le collecteur : mais alors, R est plus grande que V', puisqu'il le neutralise entièrement à distance : donc V' ne retient qu'une partie de R, le reste est maintenu par la pression de l'air, et par conséquent on doit tirer une étincelle du plateau inférieur, et ainsi successivement de chaque plateau. On voit donc que le condensateur donne un grand nombre d'étincelles successives, lesquelles finissent nécessairement par le décharger.

Dans ces décharges successives, les quantités d'électricité qui restent sur chacun des plateaux après chaque décharge, forment, ainsi que les quantités enlevées, une progression géométrique décroissante dont la raison est m^2, ce qu'on trouve aisément, d'après les dernières considérations. La première progression est $m^2\ V$, $m^4\ V$, $m^6\ V$.... , et la seconde $m\ V(1 - m^2)$; $m^3\ V(1 - m^2)$..... (t. 2 du *Traité de Phys.*, en 4 vol., de M. Biot).

376. Pour décharger un condensateur on a une verge métallique, recourbée en arc, terminée par deux boules, et fixée à un manche de verre couvert de cire d'Espagne (*fig.* 234). C'est ce qu'on appelle un excitateur; on tient le manche dans la main,

(1) soit L la quantité d'électricité positive libre sur le collecteur, $\frac{L}{1 - m^2}$ représentera l'électricité accumulée sur ce plateau, et $\frac{m\ L}{1 - m}$ l'électricité négative retenue sur le plateau inférieur. Donc $\frac{L}{1 - m^2} - \frac{m\ L}{1 - m^2}$ ou $\frac{L}{1 + m}$ sera la quantité d'électricité sur l'instrument après la décharge, et $\frac{L}{2(1 + m)}$ celle de chaque plateau.

en porte une des boules sur l'armure inférieure, et l'autre sur l'armure supérieure.

De la Bouteille de Leyde.

377. La bouteille de *Leyde* fut découverte en 1746, par Muschenbroeck et Cunéus. Cette découverte fit beaucoup de bruit en Europe; elle donna un nouvel éclat à l'électricité; chacun fut empressé d'éprouver la commotion, malgré le récit effrayant qu'on en faisait. Tout les physiciens répétèrent la fameuse expérience de Leyde, et en étudièrent les diverses circonstances. Ce fut surtout parmi les Français, toujours avides de nouvelles découvertes, que cette expérience excita une vive sensation; l'abbé Nollet donna, en présence du roi, la commotion à un régiment entier.

La théorie de la bouteille de Leyde est absolument la même que celle du condensateur.

La forme ordinaire de la bouteille est celle d'un flacon à col renversé, rempli de feuilles minces de cuivre (*fig.* 227). La surface extérieure est recouverte, jusqu'à une certaine hauteur *c d*, d'une feuille d'étain. La bouteille est fermée par un bouchon de liége traversé par une tige *a b* de métal, dont la partie supérieure est terminée par une boule, et dont la partie inférieure communique avec les feuilles de cuivre.

Pour charger la bouteille de Leyde, on la tient ordinairement dans la main, en même temps qu'on fait toucher la boule au conducteur d'une machine électrique, et on la retire quand l'électromètre à cadran marque que l'intensité de l'intérieur de la bouteille, ainsi que celle de la machine, est arrivée au maximum.

Alors, si l'on touche la boule *b* avec un doigt de l'autre main, aussitôt on se sent frappé avec violence dans les deux bras, et surtout dans les articulations. Plusieurs personnes peuvent recevoir à la fois la commotion, il suffit qu'elles se tiennent par la main. La personne qui se trouve à une extrémité de la chaîne prend la bouteille dans la main, tandis que celle qui touche le bouton *b* est à l'extrémité opposée; la transmission de l'électricité se fait avec tant de vitesse, que toutes les personnes ressentent la commotion au même instant. Nous avons vu que le condensateur doit être en communication avec le sol, pour qu'il se charge; il en est de même de la bouteille de Leyde : ainsi, une bouteille suspendue par la boule au conducteur, se charge à peine, surtout si l'air est très sec.

On prouve que dans la bouteille de Leyde, aussi bien que dans le condensateur, les électricités dissimulées ne résident pas dans les armures. On prend pour cela une bouteille dont le col a la même largeur que la base, et dont les deux armures peuvent être séparées.

378 La bouteille de Leyde est propre à montrer le rôle que joue l'air dans les phénomènes électriques. Qu'on place sous le récipient d'une machine pneumatique, une bouteille fortement chargée, on verra, avant que le vide soit complet, les deux électricités se réunir; on aperçoit même une trace lumineuse, si l'expérience est faite dans l'obscurité.

Nous avons dit que le plateau du condensateur, qui est en communication avec la machine électrique, se charge d'un excès d'électricité; il en est de même pour la bouteille de Leyde.

379. Ce que nous avons dit à l'article condensateur, relativement à la pénétration de l'électricité dans le verre, est applicable à la bouteille de Leyde; aussi, souvent des personnes qui, croyant la bouteille déchargée, la prennent sans précaution, éprouvent une forte commotion.

380. On se sert souvent de la bouteille de Leyde pour se procurer telle ou telle espèce d'électricité. Par exemple, si l'on veut de l'électricité positive, on chargera la bouteille comme nous l'avons indiqué, et l'on fera toucher le corps isolé par le crochet. La bouteille étant ainsi chargée, si l'on désire de l'électricité négative, on la posera sur un isoloir et l'on touchera le crochet; l'excès d'électricité de l'intérieur, maintenu par la pression de l'air, passera dans les corps environnans, l'armure extérieure contiendra un excès d'électricité négative; de sorte que, pour électriser un corps négativement, il suffira de le mettre en contact avec cette armure.

Un physicien, nommé Mauduyt, a disposé la bouteille de manière à avoir la décharge à une distance déterminée. Cette disposition est représentée dans la *fig.* 249. *a b* est un conducteur isolé de l'intérieur, mais communiquant avec l'extérieur; ce conducteur peut être approché plus ou moins de la boule de l'intérieur.

Charge par cascade.

381. On suspend une première bouteille par sa boule au conducteur d'une machine électrique; à un crochet fixé sous cette bouteille, on en suspend une seconde, et ainsi de suite (*fig.* 228). Au crochet de la dernière bouteille est attachée une chaîne établissant la communication avec le sol. Si l'on fait toucher le conducteur d'une machine électrique ordinaire par le crochet de la boule supérieure, l'électricité positive s'accumulera dans l'intérieur de la première bouteille, décomposera l'électricité naturelle de la garniture extérieure, attirera l'électricité négative, et repoussera l'electricité positive dans l'intérieur de la seconde bouteille, dont l'armure extérieure sera négative, et ainsi de suite, de façon que toutes les armures extérieures seront chargées d'électricité négative. Si l'on réunit la dernière armure avec l'intérieur de la première bouteille, on déchargera les bouteilles toutes à la fois; et il est visible que la commotion sera moins forte qu'avec une seule bouteille.

On augmenterait considérablement la commotion si l'on enlevait chacune des bouteilles, et si on les plaçait sur une même lame conductrice, en réunissant par une chaîne les armures intérieures, qui, comme le montrent le raisonnement et la figure, sont toutes électrisées positivement.

On obtiendrait un effet beaucoup plus considérable en réunissant ainsi les bouteilles avant de les charger, qu'en chargeant par cascade le même nombre de bouteilles pour les réunir ensuite, puisque dans la charge par cascade la quantité d'électricité va en décroissant de la première à la dernière bouteille. Le rapport entre ces deux quantités se trouve par un calcul fort simple (1).

Des Batteries électriques.

382. D'après l'observation qu'une bouteille de Leyde a d'autant plus de puissance qu'elle a une surface plus étendue, on a imaginé de réunir un certain nombre de bouteilles. Chacune des bouteilles prend alors le nom de *jarre;* toutes les jarres sont ordinairement placées dans une boîte en bois, dont l'intérieur est couvert d'une feuille d'étain (*fig.* 229); en sorte que toutes les faces extérieures communiquent entre elles. Tous les crochets des bouteilles sont réunis par une ou plusieurs tiges métalliques. Quand on veut charger une batterie, on en fait communiquer la surface intérieure avec le conducteur de la machine électrique, et la surface extérieure avec le sol; on reconnaît par l'électromètre à cadran (*fig.* 229 *bis*), placé sur le conducteur, le moment où la charge est à sa limite. Le pendule monte lentement, parce que l'électricité de la machine est en quelque sorte neutralisée à mesure qu'elle arrive dans l'intérieur; quand il cesse de monter, la charge est arrivée à la limite.

Il importe ici beaucoup d'avoir un régulateur qui indique à chaque instant l'état de la batterie; car l'électricité positive de l'intérieur, à un certain degré de charge, peut acquérir une force répulsive assez grande pour se porter sur l'armure extérieure; et comme le choc se ferait alors sur un seul point, il pourrait en résulter la rupture d'une des jarres.

On s'exposerait à des accidens graves en déchargeant avec la main une batterie seulement formée de six jarres de moyenne grandeur. Des personnes imprudentes ont eu à se repentir d'avoir reçu la commotion d'une batterie.

Effets mécaniques de l'Électricité.

383. La décharge d'une forte batterie électrique peut fondre et volatiliser les métaux, briser des cylindres en bois et en verre, produire l'inflammation de la poudre. Elle peut même tuer des animaux, lorsqu'on fait passer la décharge à travers leur corps.

La simple étincelle d'une machine électrique suffit pour faire un grand nombre d'expériences. Si l'on reçoit cette étincelle sur de l'alcool, de l'éther, placés dans une cuiller, ces liquides s'enflamment. Un mélange d'hydrogène et d'oxigène détonne et s'enflamme dans la même circonstance.

Si l'on décharge une batterie puissante à travers un fil de fer, il devient incandescent, brûle et se disperse en une infinité de petits grains à l'état d'oxide. L'or, l'argent, soumis à la même épreuve, sont subitement volatilisés.

M. Fusinieri prétend que l'étincelle électrique entraîne des particules du corps d'où elle émane. Au centre des étincelles se trouvent des particules seulement fondues, mues sur le contour elles brûlent si elles sont combustibles par le contact de l'air. Une étincelle provenant d'un conducteur en or laisse une tache jaunâtre sur chacune des faces d'une plaque d'argent qu'elle traverse. De même, suivant ce physicien, la foudre entraîne des particules de fer, de soufre. Si cette assertion est fondée, il doit donc exister de ces particules dans l'air.

(1) Supposons qu'on veuille ce rapport pour 4 bouteilles : soit V la quantité d'électricité qui se trouve sur l'armure intérieure des bouteilles; $4V$ sera la quantité d'électricité qui se trouve sur les 4 armures, quand les bouteilles sont placées sur un même plan, comme elles le sont dans une batterie; mais, dans la disposition par cascade, la charge est beaucoup moindre : en effet, V la quantité d'électricité positive de l'armure intérieure de la première bouteille attire sur l'armure extérieure une quantité d'électricité négative égale à R, et par conséquent repousse, dans la seconde bouteille, une égale quantité V' d'électricité positive. Ainsi l'on a $V' = R$.

De même la quantité d'électricité qui se trouve sur l'armure intérieure de la troisième bouteille est $V'' = R'$ (R' étant la quantité d'électricité négative maintenue par la présence de V' sur l'armure extérieure de la seconde bouteille).

La quantité d'électricité qui se trouve sur l'armure intérieure de la quatrième bouteille sera $V''' = R''$ (R'' étant la quantité d'électricité négative maintenue par la présence V'' sur l'armure extérieure de la troisième bouteille.) Or, comme la distance qui sépare les deux armures est toujours la même, puisque les bouteilles sont parfaitement semblables, on a : $\frac{R}{V} = m$, d'où $R = Vm$; et par conséquent $V = Vm$, $\frac{R'}{V'} = m$... $R' = V'm = Vm^2$ et $V'' = Vm^2$, $\frac{R''}{V''} = m$... $R'' = V''m = Vm^3$, et $V''' = Vm^3$. La somme est donc : $V + Vm + Vm^2 + Vm^3$. Donc, le rapport cherché :

$$\frac{V + Vm + Vm^2 + Vm^3}{4V} = \frac{(1 + m^2)(1 + m)}{4}$$

D'où il suit que plus m approche de l'unité, plus les deux charges seront près de l'égalité.

L'étincelle électrique, par son passage à travers l'air, détermine la réunion des deux élémens de ce fluide, et produit de l'acide nitrique. (Cavendish.) On favorise la formation de l'acide en plaçant dans l'air une certaine quantité de potasse caustique; on fait l'expérience dans un siphon dont chaque branche plonge dans un verre rempli en partie de mercure (*fig.* 245).

Les décharges électriques favorisent aussi les décompositions. Ainsi, de l'oxide d'étain placé dans un tube de verre, et exposé à l'action d'un courant électrique, laisse bientôt des traces de métal sur le verre. Wollaston a désuni les élémens de l'eau, en faisant passer à travers ce fluide une série d'étincelles électriques. Le moyen ingénieux imaginé par ce célèbre physicien consiste à insérer dans des tubes de verre capillaires, des fils très fins de platine ou d'or, à fondre ces tubes, et à amincir les fils métalliques autant que possible. L'effet est d'autant plus marqué, que ceux-ci sont plus ténus. On pourrait beaucoup varier ces expériences.

Le même physicien vit qu'un papier de tournesol placé entre deux fils qui déchargeaient une bouteille de Leyde, devint rouge près du fil positif, et reprit sa teinte primitive lorsque la partie du papier rougie fut exposée au courant négatif. En substituant une dissolution de cuivre au papier de tournesol, le fil négatif fut bientôt recouvert de cuivre : ce métal disparut par le renversement du courant électrique. (*Phys. Trans.*, 91.) Voyez *la Pile*.

La reconnaissance des physiciens a consacré une fort jolie expérience à Franklin, dont les travaux font tant d'honneur à l'esprit humain.

On place une feuille d'or entre deux planches qu'on serre fortement; la feuille d'or repose sur un carton découpé de manière à présenter le profil du portrait de Franklin; la feuille d'or, réduite en poudre par la décharge électrique, laisse sur un ruban de soie, placé sous le carton, une empreinte brunâtre qui représente assez bien le portrait.

Des Électroscopes.

384. Les électroscopes sont des instrumens destinés à découvrir les plus petites quantités d'électricité. Tous ces instrumens sont fondés sur le principe général de la répulsion qui s'exerce entre les corps chargés d'une même espèce d'électricité.

Le plus simple de tous les électroscopes est le pendule, dont nous nous sommes servi un grand nombre de fois. Cet électroscope consiste en une petite boule de moelle de sureau, suspendue à un fil de soie, sans torsion, attaché à un support en verre (*fig.* 230).

On a imaginé un grand nombre d'électroscopes. Ce sont ordinairement deux brins de paille, ou deux minces lames d'or, ou enfin deux fils métalliques terminés par des boules de sureau très légères (*fig.* 232). Supposons que nous employions les deux boules, et que nous les placions dans un bocal, afin de les défendre de l'agitation de l'air. On prend souvent un vase carré dont on vernit le col avec de la gomme laque et sur l'une des faces duquel on trace une division. On tourne le sommet de la tige à laquelle sont attachés les fils métalliques, de manière que l'écartement se fasse parallèlement à la division. Une plus grande ou une moindre amplitude indique un plus ou moins grand degré d'électricité; mais comme l'action de la pesanteur, tendant à ramener les fils dans la verticale, augmente à mesure que les fils sont plus obliques, il s'ensuit que la force répulsive des boules n'est pas proportionnelle à leur écartement. Ces sortes d'instrumens ne sont donc pas propres à donner une mesure exacte de l'énergie de l'électricité; il faut, pour ce dernier objet, avoir recours à la balance électrique (n° 338) (1).

385. Supposons maintenant qu'il s'agisse de reconnaître la nature de l'électricité dont un corps est chargé. On donnera d'avance aux boules une électricité connue. Pour cela, on approchera de la tige un bâton de verre frotté avec une étoffe de laine. L'électricité naturelle des boules et de la tige sera décomposée, l'électricité négative sera attirée par l'électricité positive du tube de verre, et la positive sera repoussée; de sorte que si l'on touche la tige avec le doigt, l'électricité positive passera dans les corps environnans; et si ensuite on retire d'abord le doigt, puis le bâton de verre, l'électricité négative, devenue libre, déterminera la divergence des boules.

Maintenant, tout corps électrisé qui, présenté à une certaine distance des boules, en augmentera la divergence, sera évidemment chargé d'électricité négative; tout corps qui la diminuera sera chargé d'électricité positive.

386. Parmi tous les électroscopes qui ont été imaginés, il en est un dont les effets sont indépendans de l'action de la gravité; tel est celui de Coulomb.

Cet instrument a beaucoup de ressemblance avec la balance électrique. Il est représenté dans la *fig.* 239.

C o est un fil de soie, de quatre pouces de longueur, tendu par une épingle *a b*, du poids de trois grains. L'épingle est attachée au fil de soie par un fil de gomme laque; *p o l* est une aiguille de gomme laque, tenant à son extrémité un cercle de cinquant *l*. A la hauteur de l'aiguille, dans la paroi de la cloche de verre, est fixé un fil métallique *r q*, scellé dans un tube de verre avec de la gomme laque. L'extrémité du fil, qui se trouve dant l'intérieur, porte une boule de sureau enveloppée d'une

(1) M. F. Bary a fait voir qu'on peut étendre l'usage des électroscopes ordinaires à des mesures exactes. (*Voy.* la note publiée par ce professeur, *Ann. de Chim. et de Phys.*, t. 59, p. 37.)

feuille d'or. Un cercle de papier, divisé en parties égales et collé sur le verre, permet d'apprécier la distance du clinquant mobile *l* à la boule fixe *r*. A l'aide d'un micromètre établi sur le couvercle, on donne au fil une position déterminée, et on ramène le cercle mobile à une distance fixe de la boule *r*. Si l'on approche de l'extrémité du fil un bâton de cire d'Espagne électrisé négativement par le frottement d'une peau de chat, l'aiguille horizontale, chargée préalablement d'électricité négative, sera repoussée; la répulsion cessera si l'on éloigne le bâton de cire d'Espagne. Veut-on rendre la répulsion permanente, qu'on touche l'extrémité *q* avec le doigt, qu'on le retire d'abord et le bâton ensuite; l'explication de cette répulsion vient d'être donnée dans le numéro précédent. La pesanteur ne contrarie ici en aucune manière la répulsion électrique.

387. L'électroscope de Behrens, perfectionné par M. Bohnenberger, est l'instrument le plus sensible qu'on connaisse en ce genre; il consiste en deux piles sèches (*fig.* 240), composées chacune de 400 disques de papier doré et de papier argenté de trois lignes de diamètre, contenus dans un tube de verre verni. Chaque pile est terminée à sa partie inférieure par un anneau de laiton, et rivée au couvercle du vase, de manière à sortir un peu en dehors. Le couvercle est en laiton, le vase est en verre. Le couvercle supérieur est traversé à son centre par un tube en verre, verni en dedans et en dehors; dans ce tube se trouve un fil de laiton, terminé à l'extérieur par une boule, et portant, à son extrémité inférieure, une lame d'or battu. La feuille d'or, étant dans l'état naturel, est également attirée par les deux piles, ne fait aucun mouvement. Mais aussitôt qu'elle est électrisée, elle est attirée par l'une et repoussée par l'autre, en sorte qu'elle se précipite sur l'une des deux.

L'électroscope dont il s'agit réunit l'avantage d'une grande sensibilité à celui de l'indication immédiate de la nature de l'électricité; cette électricité est contraire à celle du pôle vers lequel la feuille d'or se dirige. Il est cependant bon de dire que cet instrument exige, de la part de ceux qui l'emploient, une certaine habitude, parce que les piles sèches présentent en général beaucoup d'irrégularité. (Voy. plus loin ces *Piles*).

Pour augmenter la sensibilité de cet instrument, on peut lier la boule de laiton à l'un des disques d'un condensateur.

Électroscope-condensateur.

388. Volta, en réunissant un électroscope au condensateur, a formé un instrument auquel il a donné le nom d'électromètre condensateur (le nom d'électroscope condensateur conviendrait mieux). C'est à l'aide de cet instrument qu'il a pu déterminer l'électricité développée par le contact (*fig.* 240 *bis*).

La partie qui fait l'office d'électroscope est composée de deux brins de paille *a b* et *c d*, qu'on suspend ici au moyen de deux fils métalliques très déliés et terminés en crochet. Ces deux fils sont attachés à l'extrémité d'une pièce de métal qui, par son extrémité opposée, est soudée à un plateau métallique *C D*. La pièce de métal à laquelle sont fixés les fils, se visse sur l'obturateur du flacon; le plateau est recouvert sur la face supérieure d'une couche mince de vernis; le même plateau est garni inférieurement d'un fil métallique terminé par une petite boule *k*. Il a reçu le nom de collecteur, parce qu'il est destiné à recueillir de très petites quantités d'électricité, qu'on veut rendre sensibles par leur accumulation. Sur ce premier plateau en est un second, auquel est attaché un cylindre de verre *j h*, et qui est en communication avec le sol au moyen d'une tige métallique *s v*. Il serait moins avantageux d'adapter cette tige au plateau inférieur. (Voyez le *Condensateur*).

Supposons maintenant qu'on veuille accumuler dans les pailles de l'instrument l'électricité qui ne se produit qu'en très petite quantité dans un phénomène. On touchera le bouton *k* avec le corps supposé électrisé. L'électricité se répandra sur le plateau dont ce bouton fait partie. Supposons que ce soit de l'électricité positive, il se fera une décomposition dans le fluide naturel du plateau supérieur, de manière que le fluide positif sera chassé dans le sol par le moyen de la tige métallique *s v*, tandis que le fluide négatif sera attiré par le fluide positif fourni au bouton *k*; on pourra répéter ce contact un certain nombre de fois; et si ensuite on enlève le plateau supérieur, le fluide positif du plateau inférieur, devenu libre, déterminera la divergence des pailles. Il sera d'ailleurs toujours facile par ce qui précède de reconnaître la nature de l'électricité qui se trouve dans les pailles. Cet instrument est plus sensible que le condensateur de Volta; mais moins que le multiplicateur. (Voyez *Phén. électro-dynamiques*.)

De la Lumière électrique.

389. On a remarqué depuis long-temps qu'un corps électrisé répand une faible lumière dans l'obscurité, et que de plus, s'il est conducteur, il donne une étincelle brillante à l'approche du doigt ou de tout autre corps conducteur.

Quelle est la cause de ce dégagement de lumière? On pensa d'abord que le fluide électrique était lumineux par lui-même. Ensuite on chercha l'explication du phénomène dans le choc subit qu'éprouve l'air par le passage du fluide électrique. Voyons d'abord si l'air est choqué dans cette circonstance. L'instrument qui sert à cette épreuve est de l'invention de Kinnersley. Il est formé d'un tube de verre *A B* (*fig.* 241), d'un pouce de diamètre intérieur,

et de quatre à cinq pouces de hauteur ; à chaque extrémité est une virole en cuivre.

La virole supérieure reçoit une tige métallique mobile et terminée par deux boules. Le tube *A B* renferme un liquide coloré ; à ce tube est adapté un second tube latéral *C D*, recourbé à angle droit. Si l'on fait passer la décharge d'une bouteille de Leyde à travers l'air du grand tube, on voit le liquide monter et descendre aussitôt, d'une faible quantité, dans le tube latéral. L'air est donc choqué par le passage du fluide électrique. Et comme, dans un choc aussi rapide, il y a probablement dégagement de lumière, on peut attribuer à la condensation de l'air *une partie* de la lumière dégagée ; nous disons une partie, car il paraît démontré que la *combinaison* des deux électricités contribue aussi à ce dégagement. D'abord, on sait, d'après sir H. Davy, que si l'on réunit les deux extrémités d'une pile énergique par un charbon, ce corps rougit et même devient incandescent. Et comme l'expérience réussit parfaitement quand le charbon est placé dans le gaz azote, ce ne peut être un effet de combustion. D'ailleurs, le corps combustible n'éprouve pas le moindre changement dans son aspect extérieur. Ce grand dégagement de chaleur et de lumière est donc le résultat de la réunion des deux électricités. On peut ajouter que, lorsqu'on approche un corps dans l'état naturel d'un conducteur électrisé, la combinaison de l'électricité de ce dernier avec l'électricité de nature contraire du premier a toujours lieu.

L'accroissement de l'intensité de la lumière, à mesure que l'air est plus dense, ne serait pas une objection valable contre cette opinion.

390. Le vide barométrique laisse passer l'étincelle avec un dégagement de lumière plus ou moins grand. Si le tube est très chaud, la lumière est verte, vive et d'une grande intensité. Elle s'affaiblit à mesure que la température baisse. Enfin, à — 29° elle n'est sensible que dans une profonde obscurité (H. Davy, *Ann. de Ch. et de Ph.*, tom. 20). Ce qui prouve que c'est bien la vapeur mercurielle qui détermine la différence, c'est que le vide fait au-dessus de l'étain donne, à froid comme à chaud, une lumière jaune, très pâle, qui n'est aperçue que dans l'obscurité presque absolue (1).

391. Il nous reste à rapporter quelques observations qui se rattachent au sujet qui nous occupe.

1° La lumière électrique devient d'autant plus faible que l'air est plus rare. On fait, à cette occasion, quelques expériences qui reviennent toutes à peu près à la suivante : On prend un long tube de verre, terminé d'un côté par une virole en cuivre, de l'autre par un robinet, qu'on ferme aussitôt qu'on a fait le vide ; on présente ensuite la virole du tube au conducteur d'une machine électrique, en même temps qu'on le tient avec la main par le robinet ; on voit paraître un flot de lumière purpurine qui remplit le tube, et dure aussi long-temps que la machine électrique reste en mouvement. On fait la même expérience avec un vase large, qui a été appelé œuf électrique.

2° L'expérience sur le dégagement de lumière par le passage de l'électricité à travers l'air peut être faite de plusieurs manières. Par exemple, dans un tube de verre, disposez des bandelettes d'étain, en ayant soin de laisser entre elles un petit intervalle : l'électricité donne une étincelle par son passage d'une bandelette à l'autre, et produit des effets de lumière très variés. Le carreau étincelant est une lame de verre sur laquelle on applique d'un côté une feuille d'étain, de l'autre une poudre métallique grossière, qui, au moment où l'on décharge ce condensateur, présente une multitude d'étincelles.

392. La lumière électrique varie dans son aspect, selon que le conducteur électrisé est chargé de telle ou telle espèce d'électricité. Est-il chargé d'électricité positive, et armé d'une pointe, il donne, à l'approche d'un conducteur en communication avec le sol, une belle aigrette lumineuse ; chargé d'électricité négative, au contraire, il ne fait apercevoir qu'un point lumineux.

Cette expérience semble annoncer que l'électricité positive traverse plus facilement l'air que l'électricité négative : voici une autre expérience qui conduit à la même conséquence. Qu'on place une carte entre deux conducteurs terminés en pointe (*fig.* 243), et qu'ayant fait toucher l'armure extérieure d'une batterie par l'un, on fasse toucher l'armure intérieure par l'autre, la batterie sera ainsi déchargée à travers la carte, qui sera percée, non en *m*, milieu de la ligne de jonction des deux points métalliques, mais en *o*, près de la pointe négative (1).

Une nouvelle expérience de M. Trémery a paru, à plusieurs physiciens, servir de confirmation à la première. En effet, quand on met l'appareil sous une machine pneumatique, et qu'on fait le vide, comme l'a pratiqué ce savant, on trouve qu'à un

(1) Picard a remarqué, dès 1660, que la chambre barométrique devient lumineuse par l'agitation dans l'obscurité. On a reconnu depuis que ce phénomène tient à l'électricité développée par le frottement du mercure contre le verre.

Le célèbre Cavendish a fait un baromètre consistant en un siphon dont les deux branches plongeaient dans le mercure, à l'aide duquel il a constaté qu'une électricité très faible traverse le vide barométrique avec dégagement de lumière.

(1) Le trou présente de chaque côté des boursouflures comme si l'électricité partait du milieu de la carte pour sortir par chaque face. M Œrstedt explique ce fait en suppposant que le mouvement de l'électricité se fait de molécule à molécule. Ainsi le fluide positif, qui arrive au point *o*, décompose le fluide neutre, attire le fluide négatif, repousse le fluide positif, et ainsi de suite : en sorte qu'il y a autant d'étincelles que de molécules matérielles rencontrées sur le passage de l'électricité.

certain degré de raréfaction la carte est percée presqu'au milieu de la ligne de jonction des deux pointes. On pourrait cependant objecter que la résistance diminue dans le même rapport pour les deux électricités.

Électricité des nuages. — Électricité atmosphérique. — Paratonnerres.

393. *Électricité des nuages.* Franklin a découvert, en 1752, l'identité de l'électricité ordinaire avec celle des nuages ; cette découverte, et l'invention des paratonnerres, ont immortalisé son nom dans les sciences.

Avant lui, on avait bien soupçonné quelque analogie entre les effets de nos machines et ceux de la foudre, mais jamais aucun physicien n'avait conçu la pensée de décharger les nuages de leur électricité; et même, l'abbé Nollet, un des physiciens les plus distingués du siècle dernier, ne croyait pas à la possibilité de décharger les nuages par les pointes métalliques (*Lettre* 7e, 1752).

La plus grande similitude existe entre les effets de nos machines et ceux de la foudre. Les animaux tués par nos batteries électriques se putréfient avec la même promptitude que les animaux foudroyés. Les effets mécaniques sont les mêmes ; l'action des deux électricités sur les corps, la forme des étincelles, tout est pareil de part et d'autre.

Franklin, voulant soumettre ses idées à l'épreuve de l'expérience, lança, près de Philadelphie, vers un nuage électrisé, un cerf-volant armé d'une pointe. Le cerf volant était déjà depuis quelque temps en présence du nuage, sans donner de signe d'électricité, Franklin commençait à désespérer du succès, lorsqu'une pluie étant survenue, la corde de chanvre avec laquelle il tenait le cerf-volant se mouilla, et propagea assez d'électricité pour qu'il en pût tirer des étincelles (mois de juin 1752).

Dans une nouvelle expérience, il plaça une barre de fer sur sa maison, et y attacha deux clochettes (*voyez* ci-contre), afin d'être averti du moment où la barre serait chargée d'électricité. Le premier essai de ce genre réussit le 12 avril 1753.

Pendant que Franklin suivait ses idées en Amérique, les physiciens d'Europe se livraient à de nombreux essais sur le même sujet.

Dalibard fit construire à Marly-la-Ville, près de Paris, une cabane sur laquelle il plaça une barre de fer de quarante pieds de longueur, et isolée dans sa partie inférieure ; cette barre lors du passage d'un nuage, fit entendre un bruit semblable à celui du tonnerre ; après le passage d'un nuage à une petite distance, elle donna des étincelles à l'approche du doigt. Cette remarquable expérience contribua puissamment à établir l'identité dont il vient d'être question (*Lett.* 7e).

La pluie rendait imparfait l'isolement de barres semblables ; Canton, physicien anglais, imagina de placer au-dessus du support isolant un chapeau en métal. Le support étant ainsi à l'abri de la pluie, la barre conservait l'électricité qu'elle avait enlevée aux nuages ou à l'air. A l'aide de cet appareil, il reconnut que certains nuages sont chargés d'électricité positive, tandis que d'autres la sont d'électricité négative ; il put ainsi constater que la pluie, la neige, électrisaient également la barre. Pour s'affranchir du soin de visiter sans cesse la barre, et souvent sans utilité, il imagina d'y attacher un petit appareil fort ingénieux, appelé carillon électrique, il est composé de trois timbres A, A' et A'' (*fig.* 242); attachés à une même tige métallique. A, A', A'' sont suspendus, le premier par un fil de soie, et chacun des deux autres par une chaîne. Le timbre A du milieu communique avec le sol par un conducteur métallique. Des boules métalliques a et b sont suspendues à des fils de soie entre ces timbres. L'électricité de la barre se communique aux timbres extrêmes qui, étant ainsi électrisés, attirent et repoussent successivement les boules métalliques ; celles-ci vont frapper le timbre du milieu, qui les remet dans l'état naturel, et ainsi de suite. Ces oscillations continuelles des boules métalliques font sonner les timbres, et l'observateur est averti de la présence d'un nuage.

M. de Romas faisait, vers la même époque (1753), l'expérience du cerf-volant d'une manière beaucoup plus parfaite. Il entrelaçait la corde du cerf-volant de fil de fer (Charles préférait une corde métallique), et, pour se mettre à l'abri des décharges imprévues, il terminait la corde par un cordon de soie de huit à dix pieds. Il tirait les étincelles de la corde par le moyen d'un excitateur à manche isolant, dont une des extrémités communiquait au sol, tandis que l'autre touchait la corde. Ayant dirigé cet appareil ainsi perfectionné vers un nuage orageux, il en tira des étincelles de plus de dix pieds de longueur, et qui faisaient autant de bruit que des coups de pistolet. Voyez dans quels termes il rendit compte de cette expérience à l'abbé Nollet (*Académie des Sciences*, 26 août 1756). Aujourd'hui l'on pourrait faire communiquer la corde du cerf-volant avec le fil d'un multiplicateur.

Les expériences sur l'électricité des nuages ne doivent être tentées qu'avec beaucoup de précaution. On sait que le célèbre professeur Richmann, de Saint-Pétersbourg, fut renversé sans vie au moment où il approchait d'une tige métallique isolée, qu'il avait placée sur sa maison (en 1753).

394. *Électricité atmosphérique.* Les physiciens, et particulièrement Saussure, ont reconnu que les nuages sont toujours plus ou moins chargés d'électricité ; que l'électricité de l'atmosphère est plus considérable dans un lieu élevé qu'à la surface du sol ; qu'elle est en général positive dans les temps sereins (1), tant en été qu'en hiver ; que la force de

(1) Une observation de MM. Biot et Gay-Lussac semble en opposition avec ce fait. Ces physiciens ayant, dans

l'électricité diminue vers le milieu du jour; que, dans les temps orageux et agités, la nature en varie à chaque instant. Saussure dit (*Voyage dans les Alpes*) que ces variations se succèdent quelquefois avec tant de rapidité, qu'on n'a pas le temps de les noter; que les brouillards, en faisant descendre l'électricité des hautes régions de l'atmosphère, la rendent plus sensible à la surface de la terre.

M. Schübler a trouvé, 1° que l'électricité est toujours positive pendant un temps serein (1); 2° qu'elle est à son *premier minimum* peu de temps avant le lever du soleil; qu'après le lever de cet astre, elle augmente rapidement et atteint son *premier maximum* quelques heures plus tard (au mois de mai, vers huit heures), puis, elle diminue jusqu'à quatre ou cinq heures, époque de son *second minimum*. Elle atteint enfin ordinairement un *second maximum* vers une heure et demie ou deux heures après le coucher du soleil; l'étendue des oscillations est à parité de circonstances, deux fois plus grande en été qu'en hiver; ces fluctuations régulières s'observent toute l'année quand le ciel est serein; elles sont très légères sous un ciel couvert.

On voit que les périodes diurnes de l'électricité ne suivent pas la marche journalière du thermomètre.

La pluie, la neige, la grêle, sont toujours électrisées, tantôt positivement, tantôt négativement (*Ann. de Chim. et de Phys.*, t. 2, 401).

Suivant M. Peltier, la terre est électrisée négativement jusqu'à deux heures de l'après-midi.

395. On constate la présence de l'électricité dans l'atmosphère par plusieurs moyens.

Le plus simple consiste dans l'emploi d'un électroscope sensible, armé d'une verge de métal pointue, d'un mètre environ de longueur; cette verge est ordinairement composée de plusieurs pièces qui s'emboîtent les unes dans les autres (*fig.* 234). Il conviendrait, non pas de terminer la tige par une pointe, mais par une boule, et de substituer l'électromètre condensateur à l'électroscope. Le plateau inférieur communiquerait avec le sol par une chaîne. On la rend beaucoup plus sensible quand, à l'exemple de Saussure, on jette en l'air une boule pesante, attachée à un cordon métallique, et dont l'extrémité inférieure touche la tige de l'électroscope. Lorsque le cordon est développé, il communique à l'électroscope l'électricité de la couche atmosphérique qu'il touche; mais par la continuation du mouvement, il se détache et l'instrument conserve l'électricité qu'il a acquise. Pour isoler le vase de l'électroscope, il est bon de le placer dans une cloche en verre, dont l'air soit desséché par des fragmens de chaux vive. Aujourd'hui, il est plus simple d'employer, à l'exemple de M. Peltier, le multiplicateur, dont le fil communique avec l'atmosphère par une extrémité, et avec une partie humide du sol, par une autre extrémité. (*Voyez* plus loin le *Multiplicateur*.)

396. Volta et Saussure ont considéré l'évaporation comme la source principale de l'électricité de l'atmosphère. Mais ces physiciens n'ont pas été toujours d'accord sur la nature de l'électricité produite, et même ils n'ont pas obtenu un dégagement d'électricité dans toutes leurs expériences. M. Pouillet a vu, par des expériences soignées, 1° qu'il ne se développe pas d'électricité dans la volatilisation d'un corps pur (eau distillée, acides acétique, sulfurique et nitrique, concentrés), si cette volatilisation est opérée dans un vase sur lequel le liquide n'ait pas d'action chimique; 2° qu'il s'en développe si l'eau contient quelque matière acide saline ou alcaline; 3° que la vapeur d'eau qui s'exhale d'une dissolution alcaline (baryte, chaux, etc., etc.) est chargée d'électricité négative; 4° que celle que laisse dégager une dissolution acide ou saline est chargée d'électricité positive.

Il est clair que, dans tous les cas, la dissolution d'où émane la vapeur prend une électricité contraire. Ces expériences sont fort importantes, en ce qu'elles ne laissent plus d'incertitude sur une des sources principales de l'électricité atmosphérique (*Ann. de Ch. et de Ph.*, t. 35 et 36).

Pour faire l'expérience, on place sur une plaque de laiton isolée un creuset de platine, porté préalablement à une température élevée. Ce disque est lié par un fil métallique au plateau inférieur d'un électromètre condensateur, dont le plateau supérieur communique avec le sol. On jette dans le creuset le liquide qu'on veut examiner. On a ainsi l'électricité qu'il conserve. Si l'on veut celle qu'emporte la vapeur, on plonge dans cette dernière le fil métallique.

Il faut ajouter à l'évaporation le frottement de l'air contre les nuages et la terre, et contre lui-même, enfin tous les phénomènes chimiques qui s'accomplissent dans l'atmosphère.

Les sels prédominent dans les eaux qui se trouvent à la surface de la terre; ainsi, pendant la journée, cette surface doit être en général négative; c'est en effet ce que prétend M. Peltier.

L'atmosphère est quelquefois tellement chargée d'électricité que les buissons, les troncs d'arbres

leur ascension aérostatique, laissé pendre un fil métallique de 50 mètres environ, en ont trouvé la partie supérieure électrisée négativement pendant un temps serein. Pour montrer que l'opposition n'est qu'apparente, soit *ab* (*fig.* 235) le fil métallique; supposons que l'atmosphère soit dans un état d'électricité positive, croissant avec la hauteur; la partie supérieure attire le fluide négatif du fil avec une force R, et repousse le positif avec une force V. La couche inférieure produit la même chose en sens inverse, mais avec des forces moindres r et v. Ainsi l'électricité négative sera attirée vers la partie supérieure avec un excès de force égal à $R - r$, et l'électricité positive repoussée vers la partie inférieure avec un excès de force égal à $V - v$. Donc la partie supérieure du fil sera dans l'état négatif, et la partie inférieure dans l'état positif (M. Biot, t. 2, p. 456).

(1) D'après Lemonnier et d'autres physiciens, elle est quelquefois négative.

isolés, les oreilles et la crinière des chevaux, etc., deviennent lumineux. Ces étincelles sont accompagnées d'un sifflement pareil à celui que fait entendre l'eau peu de temps avant de bouillir dans les vases métalliques. C'est ce qui a été observé par plusieurs personnes à la fois dans la nuit du 17 janvier 1817 sur plusieurs points de la côte orientale des États-Unis d'Amérique. La succession des éclairs était rapide et le bruit du tonnerre très rare.

Une observation analogue a été faite le 20 février 1817, vers neuf heures du soir, par M. James Braid de Leadhills (*Ann. de Ch. et de Ph.*, t. 10, p. 284), et par M. Allemand fils, le 3 mai 1820. Ce dernier remarqua, comme M. Braid, que les bords de son chapeau étaient en feu pendant une pluie battante. En cherchant à éteindre ce feu avec la main, il en augmentait le vivacité; cette lumière n'avait point d'odeur, et ne produisait pas le pétillement qui a été remarqué dans les deux observations précédentes (*Ann. de Ch. et de Ph.*, t. 17, p. 305).

397. *Des Paratonnerres.* D'après les vues de Franklin, on a placé sur les édifices de longues verges métalliques dont l'extrémité inférieure plonge dans le sol : c'est là ce qu'on appelle *Paratonnerres.* (Voyez *fig.* 235 *bis.*)

L'utilité des paratonnerres a été d'abord vivement contestée; on avait pensé qu'ils étaient plus propres à provoquer la chute de la foudre sur un édifice qu'à la prévenir; mais l'expérience a prononcé, et l'utilité en est aujourd'hui généralement reconnue. Que fait donc le paratonnerre? La présence d'un nuage produit la décomposition de son électricité, chasse dans le sol l'électricité de même nature, et attire à la pointe l'électricité de nature opposée. L'intensité de cette dernière doit être d'autant plus grande que l'action du nuage est plus forte; et lorsque la pression est capable de vaincre la résistance de l'air, l'électricité se combine avec une portion de l'électricité du nuage qui finit par être déchargé; il s'éloigne ensuite, après avoir été d'abord attiré, en obéissant à l'action du vent, comme M. Charles l'a vu plusieurs fois, en présentant, à des nuages orageux, des cerfs-volans armés de pointes métalliques et attaché à des cordes conductrices.

On imite ce phénomène, en suspendant au conducteur d'une machine électrique un lambeau de coton attaché à un fil de lin, et en présentant une pointe métallique à ce coton électrisé.

La tige d'un paratonnerre est une barre de fer amincie de sa base à son sommet; la hauteur moyenne en est de 7 à 9 mètres, et la base a de 54 à 60 millim. de côté.

Vu la facile oxidation du fer par le contact de l'air humide, on retranche de la partie supérieure une longueur de 55 centim., et on la remplace par une tige conique de cuivre jaune, dorée à son extrémité, ou mieux encore, terminée par une aiguille en platine de 5 centim.

La tige est fixée sur l'édifice de la manière que l'exige la localité. Le conducteur se replie le long du toit, et ensuite le long du mur, il s'enfonce dans un puits ou dans un trou de 4 à 5 mètres de profondeur, si l'on ne rencontre pas d'eau. Si le terrain est sec, la profondeur doit être double.

Afin de préserver le pied du paratonnerre de la rouille, on le fait passer dans une auge remplie de charbon de bois; cette auge est formée avec des briques. L'expérience a prouvé que du fer ainsi entouré de brasse n'éprouve pas d'altération sensible dans l'espace de trente années. Le conducteur, à la sortie de l'auge, perce le mur du puits dans lequel il doit descendre; l'extrémité en est terminée par deux ou trois racines, pour faciliter l'écoulement de l'électricité.

Il est utile de choisir, pour le pied du paratonnerre, l'endroit le plus humide autour de l'édifice, et d'y diriger les eaux pluviales, afin de l'entretenir dans un état constant d'humidité.

Les barres de fer qui forment le conducteur présentant, en raison de leur rigidité, quelque difficulté pour lui faire suivre le contour des édifices, on a imaginé de les remplacer par des cordes formées de fils métalliques goudronnés.

Si l'édifice renferme des pièces métalliques un peu considérables, comme des lames de plomb appliquées sur le faîtage et sur les arêtes des toits, des gouttières, etc., il est bon de les faire communiquer au paratonnerre.

L'observation paraît indiquer qu'une tige de paratonnerre protége autour d'elle efficacement contre la foudre un espace circulaire d'un rayon double de sa longueur

Lorsqu'on place deux paratonnerres sur le même édifice, il suffit de leur donner un conducteur commun. En général, chaque paire de paratonnerre exige un conducteur : quel que soit le nombre des paratonnerres, on les rendra tous solidaires, en établissant une communication intime entre les pieds de toutes les tiges.

On doit toujours faire parvenir la foudre dans le sol par le chemin le plus court. (Commission de l'Acad., M. Gay-Lussac, rapporteur. *Ann. de Ch. et de Phys.*, t. 26, année 1824.)

398. On garantit de la foudre les bâtimens isolés, par des conducteurs plus ou moins inclinés sur leurs différentes faces. Ils sont destinés à décharger les lambeaux de nuages qu'un coup de vent violent précipiterait sur quelqu'une de ses faces.

399. D'après les expériences rapportées à l'article des batteries, il est clair que des paratonnerres trop minces fondraient. Il n'est pas d'exemple de la fusion d'un paratonnerre ayant l'épaisseur prescrite plus haut.

Le paratonnerre ne doit point offrir de solution de continuité; si cette condition est remplie, il n'y a rien à craindre : car c'est une propriété constante de l'électricité de suivre les meilleurs conducteurs; ainsi, l'on décharge impunément une forte batte-

rie, en tenant dans la main le conducteur métallique qui en réunit les deux armures. Un oiseau qui touche le même conducteur, dans une expérience analogue, ne reçoit aucune commotion. De la poudre à tirer qui enveloppe l'excitateur ne subit aucune altération.

Cependant, en faisant ces expériences, on éprouve quelquefois une commotion instantanée qui est incomparablement plus faible que celle de la batterie. L'électricité libre, en passant près de la main de l'expérimentateur, agit par influence sur l'électricité naturelle de cet organe et la décompose. Le retour à l'état naturel, aussitôt que la décharge de la batterie a eu lieu, produit une commotion : c'est là le *choc latéral*. On peut constater ce fait d'une autre manière : si l'on place un pistolet de Volta, rempli d'un mélange d'hydrogène et d'oxigène, à proximité du conducteur, au moment de la décharge d'une forte batterie, il y a explosion. Le choc latéral est d'autant plus faible que le conducteur a de plus grandes dimensions. On est donc le maître de l'atténuer autant qu'on veut.

400. *Du choc en retour*. On a vu souvent des hommes et des animaux tomber morts subitement, à l'instant d'une explosion, quoique la foudre eût éclaté à une grande distance du lieu où ils se trouvaient. Voici l'explication qu'on a donnée de ce phénomène.

Soit *A B C* (*fig.* 244), le nuage chargé d'électricité négative ; soit, placée en *E*, une personne à une assez petite distance du nuage, pour que la décomposition du fluide naturel de ses organes ait lieu ; l'électricité positive sera attirée par le nuage et l'électricité négative repoussée dans le sol. Si, dans le moment où la personne sera fortement chargée d'électricité positive, un objet *D* détermine l'explosion du nuage, les deux électricités tenues séparées par l'influence du nuage, se réuniront, et la secousse pourra être assez forte pour donner la mort.

Explication des mouvemens excités dans les corps par l'électricité.

401. 1° Une boule de moelle de sureau ou de tout autre corps, chargée d'électricité positive ou négative, et isolée de tout corps étranger, reste et doit rester immobile, puisque la pression qu'elle exerce sur l'air environnant est égale en chacun de ses points. Cette pression est, comme nous l'avons vu, proportionnelle au carré de l'épaisseur de la couche électrique.

2° Soient maintenant deux sphères électrisées *P* et *Q*; il y a trois cas à considérer : *P* et *Q* non conducteurs, *P* non conducteur, et *Q* conducteur, enfin *P* et *Q* conducteurs.

1er *cas*. *P* et *Q* non conducteurs. L'électricité étant retenue sur ces corps par la non-conductibilité, leur fait partager ses mouvemens.

Nous ne tenons pas compte de l'action de l'électricité de *P* ou de *Q* sur elle-même, parce que les répulsions ou les attractions d'un système ne peuvent imprimer aucun mouvement à son centre de gravité. Il ne faut avoir égard qu'à l'action de l'électricité de *P* sur celle de *Q*; en sorte que d'après le n° 342, la réaction électrique répulsive ou attractive des deux boules sera exprimé par $\frac{FEE'}{D^2}$; *D* étant la distance de ces boules, *E* et *E'* les quantités totales d'électricité qu'elles possèdent, et *F* un coefficient qui représente l'intensité de cette réaction, quand *D*, *E* et *E'* sont chacune égales à l'unité de leur espèce, les boules étant par hypothèse dépourvues complètement de toute propriété conductrice.

2e *cas*. *P* non conducteur, *Q* conducteur. Quand la distance de deux sphères est très grande comparativement à leurs rayons, le coefficient *F* peut être censé constant, et la réaction électrique, n'étant produite que par les quantités d'électricité *E* et *E'*, est encore représenté par $\frac{FEE'}{D^2}$; mais comme l'état électrique de la sphère conductrice varie avec la distance, l'action réciproque doit varier aussi.

Quoi qu'il en soit, on concevra bien l'attraction des deux sphères, si les électricités sont de nature différente, et la répulsion, si elles sont de même nature. Il suffit pour cela de considérer l'électricité comme retenue à la surface des corps par l'air atmosphérique.

3e *cas*. *P* et *Q* conducteurs. Ce cas se résout par les mêmes principes.

402. Faisons une application au pendule électrique. Supposons la boule *a* de ce pendule électrisée positivement. Approchons-en un bâton de résine chargé d'électricité négative (*fig.* 237).

L'électricité négative, développée sur la résine, attirera l'électricité positive libre de la petite boule. Cette électricité positive se portera en *b* en grande partie; en sorte que la pression électrique sera beaucoup plus forte en *b* qu'en *a*, et réciproquement la pression atmosphérique sera nécessairement beaucoup moindre en *b* qu'en *a*. La boule sera portée vers le tube avec une force égale à cet excès de pression. Nous ne considérons que l'électricité positive fournie à la boule. Mais il faut aussi considérer l'électricité naturelle de cette boule dont une partie est décomposée par l'influence du bâton de résine. L'électricité positive provenant de cette décomposition se portera vers la partie voisine du bâton de résine, et l'électricité négative se répandra sur la partie opposée. Il en résultera encore un excès de pression qui agira dans le même sens que celui qui détermine l'électricité primitive.

A mesure que le fil qui soutient la boule s'écarte de la verticale, la pesanteur agit avec une force

plus grande pour la faire descendre, et nous avons vu, n° 22, que si l'on représente par p le poids de la boule, et a l'angle que fait le fil avec la verticale, p sin. a sera l'intensité de la composante qui tendra à ramener le fil dans la verticale. Dans la position d'équilibre, il y a égalité entre l'excès de la pression atmosphérique, qui tend à soulever la boule, et p sin. a, qui tend à la faire descendre.

On voit souvent dans les expériences d'électricité l'attraction succéder à la répulsion. Cela arrive ordinairement quand on présente un petit corps faiblement électrisé à un corps beaucoup plus grand et plus fortement électrisé; par exemple, une boule de sureau électrisée positivement au conducteur d'une machine électrique. A mesure qu'on approche la boule, une portion plus considérable de son électricité se décompose; on conçoit que l'attraction due à cette dernière cause l'emporte sur la force répulsive due à l'électricité primitive.

403. C'est ici le lieu de parler d'une expérience qu'on fait dans tous les cours de physique. On place sur le conducteur d'une machine électrique une aiguille *A B* (*fig.* 236), formée avec un fil métallique, aiguisée à ses deux extrémités, lesquelles sont tournées en sens opposé. Cette aiguille présente à son centre un petit trou *C*, à l'aide duquel on la place sur une chape conique. Aussitôt qu'on met la machine électrique en action, l'aiguille tourne comme si elle repoussait l'air par ses pointes. L'électricité s'échappant continuellement par chaque pointe, la pression y devient nulle, et celle qui s'exerce à l'extrémité opposée *A* ou *B* contre l'atmosphère détermine le mouvement dans ce dernier sens. Ce phénomène est absolument pareil à celui que nous avons observé pour les liquides, n° 41.

L'Électricité développée par la pression.

404. La physique doit à Libes une des premières expériences qui aient rendu manifeste le développement de l'électricité par la pression. Cette expérience consiste à prendre un disque de métal qu'on tient par un manche isolant, et à le presser sur un taffetas gommé. Le taffetas acquiert l'électricité positive, et le disque de métal l'électricité négative; l'effet est d'autant plus marqué que la pression est plus forte. Au contraire, si l'on passe le métal avec frottement sur le taffetas, c'est le métal qui prend l'électricité positive, et le taffetas l'électricité négative.

M. Haüy a reconnu que beaucoup de minéraux sont susceptibles d'acquérir la vertu électrique par la seule pression : par exemple, un rhomboïde de spath d'Islande (carbonate de chaux pur), pressé entre les doigts sur deux arêtes opposées, devient électrique au point d'exercer sur le pendule de moelle de sureau une attraction très sensible. Ce cristal est celui que M. Haüy considère comme le plus propre à devenir électrique par la pression.

En général, les minéraux qui s'électrisent le plus facilement par la pression ont un certain degré de transparence, et se réduisent par la division mécanique en lames minces.

Dans ce mode de développement d'électricité, comme dans tous les autres, chaque corps prend une électricité particulière. Il est évident que si l'on veut soumettre à l'épreuve de la pression une substance conductrice, il faut la tenir par un manche isolant.

Si l'un des deux corps conducteurs communique avec le sol, il perd son électricité; l'autre corps acquiert toujours la même électricité que lorsque le corps sur lequel on le pressait était isolé.

Le liége, les fruits, les peaux, les minéraux, la houille, le bitume, les métaux, et en général tous les corps, se mettent dans des états opposés d'électricité par la pression.

Ces derniers résultats sont tirés du mémoire de M. Becquerel (*Ann. de Ch. et de Phy.*, t. 22), lequel a repris les expériences de M. Haüy, et les a beaucoup multipliées.

DE L'ÉLECTRICITÉ DÉVELOPPÉE PAR LE CONTACT (1).

405. L'année 1789 donna naissance à la découverte d'une nouvelle branche d'électricité, qui reçut le nom de *Galvanisme*, de Galvani, professeur d'anatomie à Bologne; cet anatomiste, faisant des recherches sur l'irritabilité nerveuse, vit un jour une grenouille qu'il avait suspendue par la colonne vertébrale à un crochet en cuivre, éprouver des convulsions quand les muscles touchaient un autre métal posé sur le cuivre. Cette expérience fut variée d'une infinité de manières; Galvani crut y reconnaître la preuve de l'existence d'une électricité animale. Selon cet anatomiste, le muscle était le siége des deux électricités; la surface extérieure se trouvait dans l'état négatif, et l'intérieure était dans l'état positif; les nerfs ne faisaient que l'office de conducteurs; le fluide positif passait de l'intérieur du muscle, d'abord dans le nerf, et ensuite dans l'arc excitateur; ce dernier la transmettait à la surface extérieure du muscle. (*Histoire du Galvanisme.*)

406. L'opinion de Galvani reçut l'approbation d'un grand nombre de savans. Cependant Volta soutint que l'électricité était produite par le contact des deux métaux, et que l'animal n'éprouvait de convulsions que parce qu'il établissait par ses

(1) Nous donnerons d'abord la théorie de Volta; nous ferons connaître ensuite les expériences qui en exigent la modification.

organes la communication entre les deux électricités positive et négative développées par le contact. Voici quelles sont les expériences sur lesquelles s'est appuyé le célèbre physicien de Pavie. Elles peuvent toutes se réduire à trois principales, sur lesquelles il est important d'arrêter son attention, parce qu'elles servent de fondement à la construction et à la théorie de la pile.

1° On prend deux disques circulaires, l'un de zinc et l'autre de cuivre, isolés chacun par des manches en verre, on les met en contact, et l'on porte ensuite l'un des deux disques, celui de cuivre, par exemple, sur le plateau collecteur de l'électromètre condensateur. Si l'on répète cette expérience un certain nombre de fois, on trouve, après avoir enlevé le plateau supérieur, de l'électricité négative dans l'électromètre, ce qui fait voir que le cuivre était chargé d'électricité négative. Le zinc eût donné une électricité de nature opposée (dans ce second cas, le plateau collecteur de l'électromètre condensateur devrait être en zinc, ou, s'il était en cuivre, le contact devrait être établi par le moyen d'un conducteur humide); car, dans le contact, comme dans un mode quelconque de développement d'électricité, les deux fluides sont toujours produits à la fois. On peut se dispenser d'établir la communication entre le sol et le plateau supérieur du condensateur, pourvu qu'on touche en même temps chaque plateau avec l'un des disques (1).

L'assemblage de deux lames est une petite machine électrique; le contact fait passer dans le zinc le fluide positif, et dans le cuivre le fluide négatif jusqu'à ce qu'il y ait équilibre entre la force qui produit la décomposition de l'électricité naturelle et l'action attractive des deux fluides.

2° On pourrait penser que la production de l'électricité est une suite de la pression établie entre les deux métaux. Pour détruire cette objection, il suffit de les souder ensemble, comme on le voit dans la *fig.* 238. Si l'on touche ensuite le plateau collecteur du condensateur, que nous supposons en cuivre pur, avec la partie cuivre, tandis qu'on tient la partie zinc dans la main, on trouve l'électromètre chargé de fluide négatif; si l'on fait l'expérience en tenant cette double lame par le cuivre et en mettant le zinc en contact avec le plateau collecteur, on ne trouve aucune électricité dans l'électromètre; cependant la pression est la même dans les deux cas.

Dans l'expérience n° 1°, les deux disques, étant isolés, doivent chacun retenir des quantités de fluide électrique parfaitement égales et de nature contraire, le condensateur sera chargé par l'un et par l'autre disque. Mais dans la seconde expérience, l'un des deux métaux, étant en communication avec le réservoir commun, se met dans l'état naturel; l'autre disque peut se recouvrir d'une quantité d'électricité plus considérable, comme le prouve l'expérience. Si la lame de cuivre touche le plateau inférieur du condensateur, une portion du fluide négatif qui la recouvre se portera dans le plateau, et la tension en sera diminuée; la double lame fournira par elle-même et par le sol l'électricité nécessaire pour remettre la lame de cuivre dans son état primitif; de sorte que l'électromètre-condensateur enlèvera l'électricité à la lame de cuivre, jusqu'à ce que la tension électrique soit la même et sur le plateau collecteur et sur la lame qu'il touche. Ainsi *c'est un fait* que la lame de cuivre peut rester chargée d'électricité négative, quoiqu'elle touche la lame de zinc en communication directe avec le sol. Le *contact* est donc une puissance électromotrice qui produit ce résultat.

3° Le résultat sera bien différent si le cuivre communique avec le sol, et si le zinc touche le plateau collecteur; quelque prolongé que soit le contact, l'électromètre ne donnera pas le plus petit signe d'électricité. Cette expérience est tout-à-fait d'accord avec la précédente. En effet, l'électricité négative du cuivre s'écoule dans le réservoir commun; l'électricité positive qui recouvre le zinc augmente, jusqu'à ce que l'équilibre soit établi. L'équilibre ne sera nullement changé si une seconde lame de cuivre dans l'état naturel touche la lame de zinc; c'est le cas de notre dernière expérience. Ainsi le plateau du condensateur restera dans l'état naturel.

Nous avons supposé, dans ces deux dernières expériences, le plateau collecteur du condensateur formé de cuivre pur complètement identique avec la lame de cuivre du petit système, qui nous a servi pour développer l'électricité par le contact. Il faut bien faire attention à cette circonstance, car si le plateau était en zinc, les résultats seraient inverses.

4° L'électromètre se chargera dans la dernière expérience, si le point du plateau du condensateur, que doit toucher la lame de zinc, est recouvert d'une feuille de papier mouillé, ou de tout autre corps semblable; alors le contact n'existant plus entre le cuivre et le zinc, l'électricité positive, développée sur ce dernier métal, se répandra sur le plateau inférieur du condensateur, et conséquemment l'électromètre sera chargé d'électricité positive. Cette dernière remarque est très importante; elle contribuera beaucoup à faire concevoir la construction de la pile.

407. *Construction de la pile.* On appelle pile un ensemble de couples ou de paires métalliques, séparées le plus souvent par un liquide. On donne le nom de couple ou de paire à une lame ou plaque formée par la réunion de deux métaux soudés ou simplement joints.

408. *Diverses piles.* Les premières piles étaient

(1) Volta généralisa bientôt ses idées et posa en principe, que le contact de deux substances hetérogènes quelconques produit la décomposition du fluide naturel. Le fait n'est facilement démontré par l'appareil des deux plateaux que lorsqu'il s'agit des métaux.

verticales; on les appelait piles à colonnes; chaque paire était séparée de la paire suivante par un morceau de drap à imprégné d'une dissolution saline (*fig.* 246). Cette disposition a été abandonnée parce que le poids des disques supérieurs faisait sortir le liquide des conducteurs humides, et que bientôt la pile était hors de service.

C'est pour éviter cet inconvénient qu'on a imaginé les piles à auge. Dans ces piles, les élémens sont placés et soudés deux à deux dans une auge en bois; chaque paire est séparée de la paire adjacente par un tube en verre qui a la forme d'un *U* et qui est entouré d'un mastic isolant; les trois côtés de chaque paire situés dans l'auge, sont enveloppés par du mastic semblable, de sorte que la pile est isolée complètement. Le conducteur humide est un liquide versé dans les intervalles des différentes paires (*fig.* 251). On voit que la pile à auge ne présente pas l'inconvénient que nous avons signalé dans la pile à colonne; mais elle ne réunit pas encore toutes les conditions qu'on doit désirer. Les acides puissans sont nécessaires pour faire produire à la pile des effets énergiques; mais ces acides attaquent et usent promptement les plaques. Il est donc utile de soustraire, dans l'intervalle des expériences, ces plaques à l'action du liquide excitateur. La disposition indiquée par la *fig.* 247 remplit cette condition. Chaque plaque *A B* est une paire, la partie *A* est en cuivre, et la partie *B* est en zinc. Par le moyen de la barre de bois *H K*, on abaisse et on élève les plaques; le bois étant mauvais conducteur n'affaiblit que très peu l'action de la pile par la communication qu'il établit entre les extrémités. Quand la pile plonge dans le liquide, chaque petite auge renferme deux élémens de deux paires différentes. Cette disposition ressemble à celle de l'appareil auquel Volta avait donné le nom de pile à couronne de tasse, laquelle était formée de couples recourbées plongeant dans des verres ou tasses disposés en couronne. On fait beaucoup usage dans ce moment d'une pile qui diffère un peu de la précédente; le liquide est contenu dans des verres. On la voit dans la *fig.* 248. L'extrémité zinc est *z*; c'est une lame de zinc soudée à une lame de cuivre *c*. Cette lame de cuivre est large et enveloppe l'élément zinc *z'* de la seconde paire; on sent très bien que cette enveloppe de cuivre ne touche pas le zinc; la séparation est établie par du liége. A l'élément de zinc *z'* est soudé une bande de cuivre *c'* qui va envelopper l'élément zinc de la troisième paire, et ainsi de suite. Cette nouvelle construction est attribuée à M. Wollaston.

Cette disposition présente un inconvénient pour de grandes piles, c'est d'exiger des vases qui ne se trouvent pas facilement dans le commerce. Pour l'éviter, M. Dulong a donné à l'instrument une forme différente. On voit cette nouvelle pile dans la *fig.* 255, qui en représente une section verticale; *A*, *B*, *C*, *D* sont des auges en cuivre; elles contiennent le liquide conducteur et excitateur. Chaque auge porte une oreille *a*, faite en tôle, et pleine en partie de mercure. *c d* est la lame de zinc, et *c g* la lame de cuivre qui lui est soudée. En sorte que chaque élément zinc plonge dans le liquide excitateur, et l'élément cuivre correspondant dans le mercure qui sert de conducteur. Les paires sont attachées à une traverse en bois *M N*, par le moyen de laquelle on élève la pile quand elle ne doit pas fonctionner. *O* est une ouverture servant à laisser écouler le liquide quand il n'est plus assez énergique.

La vitesse du courant électrique exerçant une grande influence, comme on le verra plus loin, il est utile d'augmenter la surface plutôt que le nombre des élémens, en sorte que deux lames de zinc et de cuivre étant données, il serait avantageux de n'en faire qu'une seule couple. Si ces surfaces étaient très étendues, on les tournerait en spirale. Pour les expériences ordinaires, on peut employer avec succès un mélange de 50 p. d'eau, 1 p. d'acide nitrique et de 1 p. d'acide sulfurique. L'acide nitrique, pour une certaine quantité de zinc dissoute, produit le plus grand effet chimique. (Voyez *Effets chimiques*.)

Piles sèches (1).

409. Les piles dont nous venons de parler ont d'abord une assez grande puissance; mais la détérioration en est rapide. On a cherché s'il ne serait pas possible d'avoir des piles qui, étant mises en action sans le concours des acides, pourraient se conserver pendant très long-temps. M. Deluc, en 1809, et M. Zamboni, en 1812, ont construit une pile sèche dont les disques sont de papier argenté (ou plutôt zinqué) sur une des faces, et recouvert d'oxide de manganèse sur l'autre. On réunit plusieurs milliers d'élémens; on forme deux colonnes verticales qu'on entoure de soufre fondu, afin de les isoler et de les préserver de l'humidité de l'air; on les établit à côté l'une de l'autre sur une feuille métallique; de cette manière, les colonnes ne font qu'une même pile. On place ensuite un petit balancier isolé entre les deux colonnes. On le voit attiré et repoussé par chaque extrémité (*fig.* 258); on a ainsi un mouvement qui dure quelquefois plusieurs années. Cet instrument se détruit pourtant à la longue. Les piles sèches sont sensibles aux variations thermométriques extérieures (M. Donné).

M. Rousseau a fait une heureuse application des piles sèches à la construction d'un instrument auquel il a donné le nom de *Diagomètre*. Cet instrument se compose d'une pile sèche et d'une aiguille aimantée du poids de quelques grains. La pile com-

(1) MM. Hachette et Desormes avaient construit une pile sèche dès 1803. Le conducteur était une couche d'amidon. Les disques étaient semblables à ceux des piles à colonnes de Volta.

munique au sol par sa base et par son extrémité supérieure avec une tige métallique isolée, qui soutient une aiguille aimantée horizontale. En face de l'aiguille est une boule métallique isolée et communiquant avec la pile. On place dans le méridien magnétique le support de l'aiguille et la boule, en sorte que l'aiguille s'appuie contre celle-ci; mais aussitôt qu'on établit la communication avec la pile, l'aiguille est déviée. Or, le temps que l'aiguille met à atteindre son maximum de déviation dépend de la conductibilité des substances que l'on place sur le passage du courant. C'est ce temps que M. Rousseau prend pour mesurer le rapport des conductibilités. Ainsi de l'huile d'olive étant interposée, l'aiguille n'atteint son maximum de déviation qu'au bout de 40′; tandis qu'avec de l'huile de faine ou de pavot elle y parvient en 27″. En ajoutant à la première un centième d'une huile étrangère, on réduit le temps à 10′. On voit que le diagomètre peut devenir précieux pour le commerce des huiles, s'il réunit les qualités que lui attribue l'inventeur.

410. *Des piles secondaires.* Quand on réunit les extrémités d'une pile isolée par un conducteur imparfait, la décharge de cet instrument n'est pas instantanée; et, si l'on supprime la communication au bout de quelques minutes, chaque extrémité du conducteur est dans le même état que l'extrémité de la pile qu'elle a touchée. Ce conducteur produit la commotion, les décompositions chimiques, et, en général, tous les effets de la pile ordinaire, mais à un degré d'énergie beaucoup moindre que la pile dont il a emprunté la vertu. De plus, l'action s'en affaiblit promptement et disparaît après quelques instans.

Un ruban humide, un certain nombre de disques métalliques séparés par des disques de carton mouillé, et en général tous les conducteurs imparfaits peuvent servir à former des piles secondaires. Ces piles ont été découvertes par Ritter. Cependant, il faut remarquer qu'avant ce physicien, Volta avait constaté qu'une bande de papier imbibée d'eau pure, et mise en contact avec les extrémités d'une pile, de manière à la décharger, acquiert à chacun de ses bouts l'électricité de l'extrémité correspondante de la pile.

M. Delarive a reconnu récemment que les fils métalliques qui ont servi à établir la communication entre les deux pôles d'une pile conservent après leur séparation assez d'électricité pour agir sur le galvanomètre, et, ce qui est très remarquable, c'est qu'ils retiennent cette électricité pendant assez long-temps, même après avoir été *touchés* par de *bons conducteurs*. De plus, dans ces fils le courant est en sens contraire de ce qu'il était dans la pile.

M. Marioni a vu que des plaques lavées conservent encore la propriété de déterminer un courant électrique. M. Vanbeck a observé aussi qu'une plaque de cuivre, rendue négative par le contact d'un morceau de zinc, reste encore négative après sa séparation de ce dernier métal; c'est-à-dire que si on la plonge dans une dissolution de sel marin, elle n'est pas attaquée, tandis qu'une plaque qui n'a pas été influencée par le zinc est attaquée par la même dissolution.

L'explication de tous ces faits curieux n'est pas encore trouvée.

Il résulte de ce qui précède, que le courant voltaïque une fois produit dans un conducteur y persiste pendant quelque temps; ne serait-ce pas là l'indication d'un mouvement imprimé aux particules des corps, lequel ne s'anéantit qu'après un grand nombre de vibrations?

---

411. Volta admettait que le liquide ne servait qu'à conduire l'électricité d'une paire à une autre; que la différence entre deux élémens en contact est constan teet indépendante de l'état de ces élémens, d'où l'on avait déduit, par des calculs fort simples, que dans une pile dont une extrémité communique avec le sol, les quantités d'électricité dont sont chargés les divers élémens, à partir de cette extrémité qui est dans l'état naturel, formaient une progression arithmétique, et que, dans une pile isolée, les élémens à égale distance du milieu qui devait être dans l'état naturel, avaient la même charge au signe près. Quoique toutes ces suppositions et les conséquences qu'on en a déduites soient fausses, le rapport dans lequel M. Biot exposait la théorie de Volta n'est pas moins un service rendu à la science.

Non seulement le liquide conducteur peut augmenter ou affaiblir l'énergie de la pile, selon qu'il est plus ou moins conducteur, selon qu'il attaque plus ou moins fortement les élémens, mais aussi il peut changer l'état électrique des métaux en contact, comme le montre le tableau suivant :

Chaque corps est positif par rapport à celui qui le précède.

Dans l'acide nitriq. concentré.	Acide nitriq. étendu.
Fer oxidé.	Argent.
Argent.	Cuivre.
Mercure.	Fer oxidé.
Plomb.	Fer.
Cuivre.	Plomb.
Fer.	Mercure.
Zinc.	Étain.
Étain.	Zinc.

Nous citerons encore quelques expériences :

Cuivre + étain — dans l'ammoniaque; l'inverse dans l'acide nitrique concentré.

Charbon + platine — dans l'acide sulfurique, chauffé à 125° environ, l'inverse dans l'eau régale.

Arsenic + fer — dans une dissolution chaude

de potasse; l'inverse dans l'acide sulfurique étendu.

Ainsi un couple d'or et de platine ne possède aucune tension, ne produit aucun courant quand on le plonge dans l'acide nitrique pur.

Voyez un mémoire de M. A. de Larive. (*Ann. de Ch. et de Phys.*, t. 37.)

Ce savant distingué pense que c'est toujours le corps le plus altéré par l'agent chimique qui prend l'électricité positive, et conséquemment le corps le moins altéré l'électricité négative, et que l'action chimique est la cause unique de l'électricité développée dans la pile.

Nous rapporterons encore une expérience de M. Faraday qui est également opposée à la théorie du contact. Une plaque de zinc et une plaque de platine sont mises par une extrémité, chacune dans un vase contenant de l'acide nitrique ou sulfurique étendu; les autres extrémités sont réunies par un papier imprégné d'une dissolution d'iodure de sodium. Les plaques ne se touchent en aucun point. La décomposition de l'iodure de sodium cessait aussitôt qu'on enlevait l'acide; de plus, l'iode se déposait sur le platine, tandis qu'il se serait déposé sur le zinc, si les métaux avaient été réunis et si l'iodure avait été le liquide excitant.

Les deux fluides électriques séparés par l'action chimique tendent à se réunir. Voilà pourquoi la tension électrique a une limite, quoique l'action chimique continue de s'exercer. Cette limite dépend de la conductibilité du corps attaquant et du corps attaqué, en sorte que ce n'est pas toujours l'action chimique la plus forte qui produit la plus grande tension.

Cette opinion avait déjà été émise par plusieurs savans; et en particulier par Ritter, par Fabroni et par Wollaston. Mais aucun physicien ne l'avait appuyée sur des faits aussi nombreux. Elle diffère de celle de H. Davy, qui a pour base la théorie de Volta, avec la nécessité d'une action chimique pour qu'il y ait courant.

Il est certain que l'action chimique a la plus grande part dans l'électricité produite, puisqu'il est bien reconnu qu'à mesure qu'on éloigne toute cause d'action chimique, l'expérience de Volta devient plus difficile. Ainsi, d'après M. de Larive, elle ne réussit pas dans le gaz hydrogène. Une expérience ancienne de MM. Biot et Fr. Cuvier avait appris que l'action d'une pile chargée avec un liquide salin s'arrête dans le gaz azote. Nous devons dire toutefois qu'on a cité en faveur de l'opinion de Volta des expériences faites avec des corps tels que le per-oxide de manganèse et l'argent, qui ne paraissent pas exercer d'action chimique l'un sur l'autre, et qui développent néanmoins de l'électricité par leur contact mutuel. Il n'est pas démontré que l'argent ne soit pas oxidé dans cette circonstance; et même en supposant que l'expérience de Volta réussit dans le gaz hydrogène, ne pourrait-on pas attribuer l'électricité à la faible combinaison momentanée, opérée entre les molécules hétérogènes du cuivre et du zinc?

Nous devons mentionner une lettre de M. Parrot (*Ann. de Ch. et de Phys.*, t. 42, p. 45), dans laquelle ce physicien cite un travail de lui, couronné en 1801 par la Société de Harlem, et dans laquelle il s'appuyait sur l'expérience pour soutenir que la cause de l'électricité développée dans la pile voltaïque est l'action chimique. M. le professeur Pfaff de Kiel soutient la théorie de Volta (*Ann. de Ch. et de Phys.*, t. 41, p. 236).

EFFETS DE LA PILE.

412. Pour comprendre les effets de la pile, il faut avoir une idée nette du courant et de la tension.

La tension électrique s'observe, lorsque les deux corps entre lesquels l'action électromotrice a lieu sont séparés l'un de l'autre par des corps non conducteurs dans tous les points de leur surface autres que ceux où cette action s'exerce; c'est ce qui a lieu, par exemple, dans une pile à auge isolée.

Le courant électrique est produit quand les deux corps électromoteurs font partie d'un circuit de substances conductrices qui les font communiquer par des points différens de ceux entre lesquels l'action électromotrice se développe. Ainsi le courant électrique s'établit dans un fil métallique qui réunit les deux pôles d'une pile isolée ou non isolée. Dans ce cas, il n'y a pas de tension.

L'intensité du courant dépend de plusieurs circonstances :

1° *De la différence entre l'énergie de l'action chimique du liquide sur chacune des parties du couple métallique.* Ainsi le fer, qui est moins attaqué que le zinc et plus que le cuivre dans l'acide sulfurique étendu, donne lieu, avec chacun de ces métaux, à un courant plus faible que celui qui résulte de la réunion du zinc et du cuivre. On conçoit ce fait en se rappelant que le corps le plus attaqué tend à se charger d'électricité positive. La force électromotrice sera donc d'autant plus faible que les deux corps seront moins inégalement attaqués.

2° *Du changement du conducteur.* L'électricité, en passant d'un conducteur dans un autre, éprouve toujours une perte, et cette perte est d'autant moindre que l'intensité du courant est plus grande (1), et que le passage d'un conducteur à un autre a été plus multiplié (2), ce qui explique pourquoi le courant produit par une pile d'un grand nombre de plaques traverse mieux un mauvais conducteur qu'un courant provenant d'une pile composée d'un petit nombre d'élémens. L'ordre des conducteurs a une autre influence. Ainsi l'affaiblis-

(1) M. A. de Larive (*Ann. de Chim. et de Phys.*, t. 37).

(2) M. Mariani.

sement n'est pas le même par le passage à travers une double plaque de cuivre et de zinc dans l'ordre zinc et cuivre que dans l'ordre cuivre et zinc. L'électricité se comporte ici comme la chaleur rayonnante (n° 97).

La perte éprouvée par le courant, en passant d'un conducteur à un autre, fait concevoir l'avantage, à égalité de surface, d'une pile composée d'un très petit nombre d'élémens sur une pile composée d'un grand nombre.

Ces expériences font encore concevoir l'affaiblissement du courant par l'interposition, dans la pile, d'un ou de plusieurs diaphragmes ou lames métalliques.

3° Plus la surface des parties métalliques d'une pile en contact avec le liquide est grande, plus l'intensité du courant est considérable (1). Ce qui est évident aujourd'hui puisque l'action chimique est plus grande.

4° Le courant a la même intensité sur toute l'étendue du fil qui joint les deux pôles d'une pile (2).

5° Des couples de masses différentes, mais dont les surfaces sont égales, produisent le même courant (3). Ce doit être encore si les surfaces en contact mutuel avec le liquide sont les mêmes.

6° L'élévation de température augmente l'énergie du courant, souvent même change le signe de ce dernier. Ce qui résulte de ce que la température modifie l'action chimique.

Ce qui est encore inexpliqué, c'est que la pile présente des minimum et des maximum de puissance. Ainsi 14 et 70 couples de 16 pouces carrés de surface produisent le plus grand effet.

Une pile de 20, de 24 ou de 120 couples a la même intensité. On suppose qu'on ait mesuré l'intensité du courant par son action sur une aiguille aimantée. (*Voyez* les phénomènes électrodynamiques.) On trouve des résultats analogues quand on étudie la pile sous le rapport de sa puissance chimique ou calorifique.

413. *Effets physiques.* Un condensateur mis en communication avec une des extrémités d'une pile, l'autre extrémité étant en communication avec le sol, se charge au même degré que par une machine électrique dont la tension serait celle de l'extrémité touchée (M. Biot, M. Van Marum). Cette charge ne dépend pas des dimensions des élémens, mais seulement de la tension. Les mêmes savans avaient cru remarquer qu'elle était proportionnelle au nombre des élémens. Ce résultat est tout-à-fait contraire aux expériences plus récente de M. Larive, qui affirme que le nombre des élémens n'augmente pas la tension, et que la tension aux extrémités d'une pile composée de couples égaux, est la même que dans un seul couple.

414. *Effets calorifiques.* La décharge de la pile produit tous les effets auxquels donnent naissance les instrumens condensateurs. En effet, si l'on réunit les deux extrémités d'une pile isolée ou non isolée, par un fil de métal, par exemple de fer, ce fil rougit et entre en combustion avec un grand dégagement de lumière. La plupart des autres métaux se comportent de même (1).

Le savant professeur de Harlem a fait sur ce point, conjointement avec M. Pfaff de Kiel, une série d'expériences intéressantes, dans lesquelles il a bien mis en évidence l'avantage de l'étendue des plaques pour produire la fusion et la combustion des fils.

On voit bien que la puissance d'une pile pour donner la *commotion* ou produire la *fusion* des métaux, doit croître avec l'*étendue* des plaques. Même d'après ce qui précède, la combustion doit être plus facilement opérée avec un seul élément qu'avec une pile composée.

M. Children, par l'emploi d'une pile à grandes dimensions, a augmenté beaucoup les effets obtenus par M. Van Marum. Chaque plaque de zinc avait six pieds en longueur et deux pieds huit pouces en largeur; celle de cuivre avait une surface double; cette pile était analogue à celle qui est représentée (*fig.* 248).

En excitant une pile de 21 paires par de l'eau contenant un vingtième de son poids d'acide nitrique et d'acide sulfurique, le savant anglais est parvenu à fondre même des fils de platine de 2 pouces 1/4 de long et de 2 lignes environ de diamètre.

On peut étudier les effets calorifiques comme l'a fait M. de Larive, en recevant le courant dans la lame du thermomètre de Breguet.

H. Davy, avec la pile de l'Institution royale de Londres, présentant une surface de plus 100,000 pouces carrés, a obtenu des effets de lumière et de chaleur extraordinaires. Le jet de lumière s'échappait par deux pointes de charbon en communication avec les pôles de la pile. Les substances les plus infusibles, le quartz, la magnésie, la chaux, etc., fondaient immédiatement dans cette source de chaleur; ces expériences réussissent dans le vide ou dans le gaz azote, ce qui exclut toute idée de combustion.

M. Brande a vu depuis, que cette lumière si vive détermine, comme la lumière du soleil, les actions chimiques, par exemple la combinaison du chlore et de l'hydrogène, la décomposition du chlorure d'argent, etc.

C'est dans les points où le courant éprouve le plus de résistance, que l'échauffement est le plus grand. Ainsi dans un fil composé de parties hétérogènes,

(1) MM. Gay-Lussac et Thénard, *Recherches physico-chimiques.*
(2) M. Becquerel (*Ann. de Chim. et de Phys.*, t. 32).
(3) Mariani.

(1) Au moment où l'on approche deux fils, communiquant chacun avec une extrémité de la pile, on les voit s'attirer à une distance sensible.

ce sont les parties les moins conductrices qui s'échauffent le plus. C'est ainsi qu'on peut porter à l'ébullition un liquide conducteur, en le partageant en un grand nombre de compartimens par des diaphragmes de vessie.

415. *Effets physiologiques.* Quand on réunit les extrémités d'une pile par les organes, on éprouve une commotion continue, qui se fait sentir dans la main, dans le bras, etc., selon le degré d'énergie de l'instrument. La commotion est continue, parce que la pile se recharge elle-même. Quand le nombre des paires ne surpasse pas cent, et que la surface de chaque élément n'est pas au-dessus de 4 pouces carrés, cette commotion est reçue sans le moindre danger, et même on est obligé de se mouiller les mains afin de rendre la communication plus parfaite. Mais il n'en serait plus de même si les plaques avaient des surfaces beaucoup plus considérables, si elles avaient, par exemple, un pied de côté.

On a fait de nombreuses expériences sur les effets thérapeutiques de la pile. On a essayé l'action de cet instrument contre les rhumatismes, les paralysies, etc.; mais on a obtenu peu de résultats satisfaisans.

On a remarqué que des courans électriques rappellent quelquefois à la vie des animaux asphyxiés depuis plus d'une demi-heure, raniment les fonctions digestives suspendues par la section des nerfs qui se rendent à l'estomac, excitent des mouvemens péristaltiques dans certains vaisseaux, etc. (M. W. Philip.).

M. L. Nobili (*Ann. de Ch. et de Ph.*, t. 44, p. 60) vient de faire un grand nombre d'expériences qui l'ont conduit à penser que des courans interrompus pourraient produire de bons effets dans la paralysie, et des courans continus dans le tétanos. (*Voyez* les ouvrages de physiologie.)

416. *Effets chimiques de la pile.* L'invention de la pile voltaïque a été la source des plus belles découvertes. C'est par le secours de cet ingénieux instrument que la nature des terres et des oxides a été dévoilée. Il n'est pas de substance composée dont une pile ne puisse désunir les élémens.

Nous indiquerons successivement la décomposition de l'eau, des oxides, celle des acides et des sels.

417. La première application qu'on ait faite de la pile à la chimie est due à MM. Carlisle et Nicholson. C'est la belle expérience de la décomposition de l'eau.

Le petit appareil en usage dans les cours est fort commode pour cette expérience. Il est représenté dans la *fig.* 256; c'est un entonnoir de verre dont la petite ouverture reçoit un bouchon, à travers lequel on a fait entrer deux tubes de verre; chaque tube sert d'enveloppe à un fil de platine; les fils de platine, les tubes, le bouchon, tout est scellé avec de la cire d'Espagne. Les deux fils sont tournés en crochet à l'extérieur, et s'élèvent parallèlement l'un à l'autre dans l'entonnoir. On remplit l'entonnoir d'eau, et l'on recouvre chaque fil d'une petite cloche remplie du même liquide. On fait communiquer chaque fil de platine par son crochet extérieur à une extrémité de la pile, et le dégagement de gaz commence aussitôt; l'oxigène part du fil positif et l'hydrogène du fil négatif; seulement il est bon d'ajouter à l'eau de l'entonnoir un peu d'acide sulfurique, afin d'en augmenter la propriété conductrice. Si l'on mesure le volume des gaz, on trouvera deux fois autant d'hydrogène que d'oxigène; c'est là, en effet, le rapport de ces gaz dans l'eau. Il ne faut pas substituer aux fils de platine des fils de fer, ou d'autre métal oxidable, parce qu'une partie de l'oxigène entrerait en combinaison.

Il résulte des expériences de MM. Gay-Lussac et Thénard que le dégagement de gaz est presque nul, si l'entonnoir est rempli d'eau bouillie et pure, et qu'en général le dégagement est d'autant plus abondant que la quantité d'acide ou de sel que ce liquide renferme est plus considérable. On augmente encore le dégagement de gaz en élevant la température du liquide.

418. La seconde application importante a été faite par M. Cruikshanks. Ce savant ayant répété l'expérience de Carlisle et Nicholson, en mêlant à l'eau de l'acétate de plomb, du sulfate de cuivre, vit le fil négatif se couvrir de petites aiguilles métalliques. L'oxigène de l'oxide se portait à l'extrémité positive avec l'acide qui tenait le métal en dissolution. L'eau de la dissolution était aussi décomposée.

Le courant de la pile désunit également les élémens des acides et des oxides libres.

L'acide sulfurique concentré, *fig.* 254, soumis à l'action de cet instrument, laisse dégager son oxigène à l'extrémité positive, et dépose son soufre à l'extrémité négative.

Si l'on répète la même expérience avec un hydracide, l'hydrogène se dégage toujours à l'extrémité négative, tandis que le corps acidifiant se rend libre à l'extrémité positive. Ainsi, l'acide hydriodique est décomposé aussitôt qu'il est soumis au courant voltaïque; l'acide hydrochlorique n'y résiste pas non plus bien long-temps. Le chlore, avec sa couleur verte, apparaît à l'extrémité positive, et l'hydrogène à l'extrémité négative. Si l'on soumet successivement de l'acide sulfurique concentré et de l'acide hydrosulfurique à l'action d'une pile, dans le premier cas le soufre se porte au pôle négatif, et dans le second au pôle positif; d'où l'on voit que, sous l'influence de la pile, le même corps ne prend pas toujours la même électricité.

419. La plus belle application, la plus féconde en résultats qu'on ait faite de la pile, est la décomposition des alcalis. Cette découverte, due à sir H. Davy, a singulièrement contribué à l'avancement de la chimie. Ce célèbre chimiste ayant fait agir la pile sur les alcalis (la potasse et la soude), vit l'oxigène se dégager au fil positif, et le métal

se réunir en une substance brillante au fil négatif. Ces métaux décomposent l'air et l'eau à la température ordinaire, et même, le potassium (métal de la potasse), jeté dans l'eau, y brûle avec lumière; la chaleur qu'il produit détermine la combustion de l'hydrogène au contact de l'air. C'est cette grande affinité pour l'oxigène qui faisait qu'on ne pouvait recueillir que des atomes de ces substances. On doit à M. le docteur Seebeck un moyen fort simple de les défendre du contact de l'air : il consiste à unir le potassium ou le sodium au mercure, à mesure qu'il est désoxidé. A cet effet, on coule un peu d'hydrate de potasse ou de soude, de manière à lui donner la forme d'un verre de montre. On remplit cette coupelle de mercure, on la pose sur une plaque métallique; on fait communiquer le support de métal avec le fil positif, et l'on plonge dans le mercure le fil négatif. On a soin d'humecter l'hydrate, afin d'en augmenter la propriété conductrice. Il faut une pile assez énergique. L'oxigène de l'hydrate et celui de l'eau se rendent au fil positif, l'hydrogène se dégage au fil négatif, le métal se porte au même fil, et s'unit au mercure. Si l'on veut seulement rendre la décomposition sensible, on jette au bout de 5 à 6 minutes le mercure dans un verre d'eau, et l'on voit à l'instant l'hydrogène de ce dernier liquide se dégager. Au contraire, veut-on recueillir le métal, on donne à l'expérience plus de durée; on jette de temps à autre l'amalgame dans l'huile de naphte, et l'on renouvelle le mercure. Quand on s'est ainsi procuré une suffisante quantité d'amalgame, on le distille dans une petite cornue de verre; l'huile et le mercure se volatilisent; le potassium ou le sodium reste dans la cornue. Il nous paraîtrait utile de faire arriver un courant d'hydrogène sec dans la cornue; ainsi, l'on défendrait le métal de l'action de l'air.

Des expériences analogues ont démontré à M. Davy et à M. Seebeck la composition des autres alcalis.

On n'est parvenu, même avec les piles les plus puissantes, qu'à séparer de très petites quantités de métal. MM. Gay-Lussac et Thénard, après la découverte de M. Davy, ont obtenu, par le secours seul des affinités chimiques, le potassium et le sodium en quantité assez considérable pour qu'on puisse employer ces métaux dans les analyses chimiques (voyez *Chimie*, art. *Potassium*, t. 2).

Avant la décomposition des alcalis, MM. Berzélius et Hizinger (*Ann. de Ch.*, 51) avaient fait servir la pile à la séparation des élémens des acides, des sels et même des oxides métalliques. Ces savans chimistes suédois avaient remarqué que l'oxigène et les acides se portent au fil positif, tandis que l'hydrogène, les alcalis et les métaux se portent au fil négatif.

420. Une particularité bien remarquable dans ces décompositions, c'est le transport des substances soumises à l'action de la pile. Ainsi, qu'on remplisse un siphon de sulfate de potasse et un second siphon d'eau pure, qu'on joigne ces deux siphons par un peu de coton mouillé (*fig.* 252), au bout de quelque temps le siphon qui communique au fil positif ne renferme que de l'acide sulfurique, et la potasse a passé complètement du côté du fil négatif.

Si l'on remplace le sulfate de soude par du nitrate d'argent, et que le fil positif plonge dans le sel, l'oxide métallique est décomposé, et le coton se couvre d'une multitude de parcelles d'argent.

On peut rendre encore l'expérience plus curieuse. Au lieu de deux siphons, qu'on en emploie trois, et qu'on mette du sulfate de potasse dans celui du milieu, et de l'eau distillée dans les deux autres; le même résultat sera obtenu après quelque temps, et tout le sel sera décomposé.

Les réactifs les plus sensibles ne sont pas affectés par le passage des substances soumises au courant électrique; ainsi, l'acide sulfurique traverse la teinture de tournesol sans la rougir; il traverse également l'ammoniaque, la potasse, sans s'y unir.

Sir H. Davy a remarqué que l'acide sulfurique est arrêté par la baryte, et réciproquement. Mais le transport complet aurait encore nécessairement lieu avec une pile puissante.

421. Les phénomènes chimiques de la pile sont encore enveloppés de quelque obscurité. Voici diverses explications qui ont été proposées.

1° Quand on met les deux fils d'une pile en contact avec un corps qui peut être décomposé par cet instrument, on suppose que les molécules de ce corps se mettent dans un état opposé d'électricité, puisque les unes se portent au fil positif, et les autres au fil négatif.

Dans l'eau, par exemple, toutes les molécules d'oxigène placées sur le courant électrique prennent l'électricité négative, et les molécules d'hydrogène l'électricité positive (*fig.* 253). La dernière molécule d'oxigène se dégage à l'état de gaz; il en est de même de la dernière molécule d'hygrogène. Les molécules intermédiaires se réunissent pour former de l'eau (1). Cet effet se répète pendant tout le temps que le courant voltaïque est maintenu. (Grotthus, *Ann. de Ch.*, t. 58.)

2° M. Biot suppose que tout liquide conducteur placé entre les deux pôles d'une pile, se partage en deux portions, douées d'un état électrique particulier, et que les élémens de l'eau, ayant des électricités opposées, tendent à se rendre dans la portion

(1) Comment concilier cette explication avec l'expérience suivante.

Si l'on fait plonger le fil + dans un sel, dans du sulfate de zinc ou de cuivre par exemple, et le fil — dans l'eau, les deux liquides étant séparés par une vessie, on verra l'oxide métallique s'accumuler au pôle —. Les décompositions et les recompositions qu'admet M. Grotthus ne peuvent pas avoir lieu ici.

du liquide qui possède une électricité contraire à la leur.

M. Biot fonde son explication particulièrement sur ce fait, que lorsqu'on réunit les deux pôles d'une pile par le moyen d'un siphon plein d'une dissolution saline, de sulfate de soude par exemple, teint par du sirop de violettes, la portion du tube qui est en contact avec le pôle + devient rouge, et celle qui est en contact avec le pôle — devient verte.

Cet effet n'est-il pas le résultat de l'action directe de l'alcali et de l'acide rassemblés, l'un au pôle —, l'autre au pôle + ? En effet, si l'on partage le siphon en trois portions par deux vessies disposées transversalement, la couleur de la partie du milieu ne sera pas altérée.

C'est le liquide en contact avec chaque pôle, qui est décomposé, puisque si l'on met du sulfate de zinc dans la portion du siphon du milieu, et de l'hydrochlorate d'ammoniaque dans les deux portions extrêmes, le sel ammoniacal est seul décomposé.

Dans cette explication, comme dans celle de Grotthus, l'effet de la pile devrait être d'autant plus grand que la force répulsive aux extrémités des fils serait plus considérable. Ainsi, la décomposition de l'eau pure devrait être plus facile que celle du même liquide rendu plus conducteur par la présence d'un acide; les deux fils opposés de deux piles différentes et isolées devraient décomposer l'eau dans laquelle ils plongent : ce qui est contraire à l'expérience. Il faut en conclure que le passage du courant électrique à travers les molécules d'un composé favorise la séparation de ses élémens. Cependant nous ferons remarquer que M. Faraday annonce avoir reconnu récemment qu'un pôle seul décompose un liquide (l'un des élémens désunis se porte alors à l'autre pôle).

3° M. de Larive demande si l'on ne pourrait pas considérer les deux courans comme agissant sur les molécules des corps; le courant qui sort du pôle + entraîne l'hydrogène et les bases à travers le conducteur liquide, et les abandonne au pôle — en entrant dans le conducteur solide. Le courant parti du pôle — agit de même, entraîne l'oxigène et les acides.

Si l'on réunit les deux pôles d'une pile par un liquide, des courans s'établissent dans ce liquide, comme on s'en assure à l'aide du galvanomètre. Si l'on sépare perpendiculairement à la direction du courant, la colonne liquide par une lame de platine, il y a de chaque côté de cette lame dégagement de gaz; quand le courant est énergique, la quantité de gaz dégagé reste la même aux deux pôles.

Si l'on réunit par un fil métallique deux parties de liquide dans chacune desquelles plonge un des pôles d'une pile, il y a alors quatre pôles, et le dégagement de gaz a lieu aux extrémités du fil comme aux pôles.

4° M. Ampère a proposé une autre explication.

Pour la concevoir, il faut d'abord admettre que les particules des corps sont dans un état permanent d'électricité, état qui est *positif* pour les unes et *négatif* pour les autres. Les alcalis et l'hydrogène sont dans le premier cas, les acides et l'oxigène dans le second.

Si ces particules ne manifestent aucun signe d'électricité quand elles sont isolées, c'est parce que celle qui leur est propre doit, d'après les lois ordinaires des actions électriques, décomposer le fluide neutre qui remplit l'espace autour d'elles, repousser l'électricité de même nom, attirer le fluide de nature opposée, et former ainsi de ce dernier une petite atmosphère électrique autour de leurs particules, telle que, son action à distance se trouvant égale et opposée à celle de l'électricité propre à ces particules, cette action s'oppose à toute décomposition ultérieure du fluide neutre environnant (n° 371). Chaque particule est alors dans le cas d'une bouteille de Leyde dont les parois seraient très minces.

Supposons maintenant qu'on mette en contact des particules d'oxigène et des particules d'hydrogène, et que, par une élévation de température ou de toute autre manière, on fasse communiquer l'électricité positive libre qui entoure les particules d'oxigène avec l'électricité négative libre qui entoure les particules d'hydrogène, ces deux électricités, se réunissant, formeront du fluide neutre; et les électricités propres de l'hydrogène et de l'oxigène cessant d'être dissimulées, les particules de ces corps se combineront pour former de l'eau. Il est évident que chaque particule d'eau se conduira comme n'ayant aucune électricité, si les quantités de fluide des particules d'oxigène et d'hydrogène sont dans un rapport convenable pour qu'elles se dissimulent complètement, et il n'y aura aucune tendance dans la particule d'eau pour décomposer le fluide neutre environnant.

Dans les circonstances où le corps électro-négatif est en excès, le composé sera électro-négatif; c'est le cas des acides; leurs particules sont entourées d'une atmosphère positive; les alcalis, au contraire, renferment un excès de particules électro-positives et sont électro-positifs, et les atmosphères de leurs particules sont négatives. Les alcalis et les acides pourront, par leur réunion, donner des sels neutres, des sels électro-négatifs et des sels électro-positifs.

Dans cette hypothèse, on voit bien pourquoi, au moment de la combinaison d'un acide et d'un alcali, le courant électrique dans le fil conducteur se manifeste *de l'acide à l'alcali*. Les deux atmosphères électriques de nature contraire se réunissent en partie dans le liquide, et en partie par le conducteur métallique, qui leur offre un passage plus facile.

On voit avec la même facilité pourquoi, dans les décompositions chimiques, les particules d'oxigène et celles des corps électro-négatifs se portent à

l'extrémité positive de la pile, tandis que celles d'hydrogène et des corps électro-positifs se portent à l'extrémité opposée. On comprend encore comment le courant électrique, déterminé par le simple contact d'un alcali et d'un acide solides, est différent de celui qui se manifeste dans leur combinaison. Une partie des atmosphères électriques se combinant, chacun des deux corps décompose le fluide neutre du fil métallique qui établit la communication entre les parties non en contact, et attire à lui l'électricité contraire à la sienne. C'est ce qui se passe, par exemple, dans le contact de la potasse ou de la chaux solide et de l'acide oxalique ou citrique également solide.

422. *Effets mécaniques.* Le fil *positif* d'une pile possède une force *d'impulsion vers le fil négatif.* M. Porret jeune l'a découverte (*Ann. de Chim. et de Phys.*, t. 2, p. 137) de la manière suivante : il partage un vase en deux parties par une cloison perméable, par une vessie, par exemple ; il remplit l'une des parties d'eau ; dans l'autre, il verse quelques gouttes du même liquide. Il plonge le fil positif d'une pile dans la première, et le fil négatif dans la seconde ; en moins d'une demi-heure le niveau est le même dans les deux parties ; et ensuite le niveau s'élève dans la partie communiquant avec le fil négatif à 3/4 de pouce plus haut que dans l'autre partie. Cet effet est obtenu avec une pile assez faible ; il serait sans doute plus marqué avec un appareil plus fort. M. Delarive a remarqué que l'effet n'a plus lieu quand on rend l'eau acidulée.

M. Pouillet rapporte une expérience qu'il a faite, et qui est l'inverse de celle-ci : il remplit de mercure un siphon jusqu'à la hauteur de 3,5 pouces environ ; il verse dans l'une des branches une dissolution saline ; il plonge dans celle-ci le fil négatif, et le fil positif dans l'autre branche. La dissolution saline se glisse peu à peu entre le mercure et le verre, et passe en totalité dans la branche dans laquelle plonge le fil positif.

M. Erman avait remarqué dès 1808 que des globules de mercure soumis au courant de la pile prennent un mouvement de rotation très rapide.

H. Davy a vu que si l'on fait plonger les deux fils d'une pile dans un large vase contenant quelques globules de mercure, et de l'eau contenant 1/2000 de sulfate de potasse, on voit ceux-ci éprouver une vive agitation et s'allonger vers le fil négatif.

Des fragmens d'alliage de potassium ou de sodium, jetés sur un bain de mercure sec ou couvert d'eau, éprouvent aussi des mouvemens gyratoires. Il se forme alors une pellicule noire qui jouit de la propriété singulière d'être attirée par une tige métallique quelconque plongée dans le bain jusqu'au contact du mercure, et par le fil positif, tandis qu'elle est repoussée par le fil négatif. (M. Sérulas.)

M. J. F. W. Herschel a poussé ses recherches sur ce sujet beaucoup plus loin. Voici les principaux résultats qu'il a obtenus :

1° Quelques grammes de mercure sont placés dans un vase en verre ou en porcelaine, et recouverts d'une couche d'acide sulfurique d'un quart de pouce environ d'épaisseur. Si l'on plonge les deux fils d'une pile très faible dans l'acide, le mercure éprouve à l'instant une violente agitation ; si les deux pôles sont aux côtés opposés du mercure, mais à une certaine distance, on voit le globule s'allonger, et l'on voit une foule de courans se diriger sur la surface du mercure, du fil négatif au fil positif. Si les fils forment un triangle avec le globule, celui-ci tourne sur lui-même en se dirigeant vers le fil négatif, auquel il finit par s'attacher ; enfin, si l'un des fils est tenu verticalement au-dessus du mercure, on aperçoit des ondulations circulatrices.

Des effets analogues, à l'intensité près, sont produits avec les autres acides et avec les dissolutions salines. Les dissolutions alcalines concentrées semblent paralyser les mouvemens du mercure.

Dans plusieurs liquides, et spécialement dans les nitrates, il se forme deux courans, l'un du pôle négatif, l'autre du pôle positif.

Du mercure parfaitement purifié n'éprouve aucun des phénomènes décrits ; et la liqueur n'est agitée que par les bulles qui résultent de la décomposition de l'eau ; mais la présence d'une quantité très petite de sodium ou de potassium, par exemple 1/1000,000, suffit pour lui donner une grande activité. Le zinc, le plomb, le fer et l'étain jouissent de la même propriété, mais à un degré moindre. (*Ann. de Chim. et de Phys.*, t. 28, p. 280.)

M. Dutrochet a désigné sous le nom d'*endosmose* (1) un phénomène qu'il a découvert et qui a probablement un grand rapport avec celui de Porrett.

M. Dutrochet a appelé endosmomètre l'appareil qui lui a servi dans ses expériences. Cet appareil consiste en un tube de verre *m n* (*fig.* 248 *bis*), terminé par un réservoir évasé ; et fermé par une vessie. Supposons qu'on remplisse le tube *m n* et le réservoir *n c d* en partie d'alcool, et qu'on le tienne suspendu dans un vase rempli d'eau, on verra le liquide monter graduellement dans le tube *n m*, et si ce tube n'a qu'un demi-mètre de longueur, le liquide, après vingt-quatre heures, déverse vers le sommet.

Cette expérience réussit avec l'eau et l'eau gommée, l'acide acétique, l'acide nitrique, et surtout l'acide hydrochlorique. Il n'y a pas endosmose d'un liquide au même liquide ; certaines membranes végétales ou animales, des plaques de terre cuite et d'ardoise jouissent de la même propriété que la vessie. M. Dutrochet pense qu'il y a dans le contact des deux liquides et de la membrane production d'un courant électrique, qui entraîne le liquide du pôle positif au pôle négatif.

(1) *Osmos*, pulsion ; *endosmos*, impulsion ; *exosmose*, de *ex*, et d'*osmos*, expulsion.

Plusieurs physiciens ont vu dans ces expériences un phénomène de viscosité.

423. Deux fils conducteurs s'attirent ou se repoussent, selon que les courans qui les parcourent vont dans le même sens ou en sens opposé. L'action d'un fil conducteur aimante un fil d'acier, etc., etc. (*Voyez* les Phénomènes électro-dynamiques).

424. Sir H. Davy a fait, il y a quelques années (1824), une belle application de la science, en trouvant le moyen de soustraire les feuilles de cuivre du doublage des vaisseaux à l'action corrosive de l'eau de mer. On sait que cette action est telle, que souvent un voyage de quelques mois nécessite des réparations considérables. Le cuivre, métal positif, s'empare d'une partie du chlore des chlorures de l'eau de mer, et l'oxigène de l'air s'unit aux métaux (sodium, magnésium) des chlorures. Le cuivre se saisit du chlore parce qu'il est positif; mais si on le rendait négatif, en le mettant en contact avec un métal plus positif, son action sur l'eau de mer devrait être nulle, puisque la destruction a particulièrement lieu par suite de sa combinaison avec le chlore, corps essentiellement négatif. C'est ce que sir H. Davy a constaté en appliquant sur les feuilles de cuivre des lames de zinc, de fer ou de fonte.

Quel rapport doit-il exister entre la surface du métal protecteur et la surface du cuivre ? L'expérience indique qu'il peut varier de 1/40 à 1/150. Ce dernier est cependant préférable : le cuivre, devenant trop négatif par le contact d'une lame de zinc ou de fer de 1/40 de sa surface, attire les oxides (magnésie, chaux, etc.), se couvre d'une croûte blanche, de végétations, etc. Il est clair que le métal protecteur doit être renouvelé de temps à autre. On a mis en France, en Angleterre, etc., cette belle application à profit (1). Mais on a reconnu que le cuivre se charge de chaux, de magnésie et d'une grande quantité de coquillages, telle que le mouvement du bâtiment en est ralenti. Il doit exister cependant un rapport qui mettrait le cuivre dans un état positif ou négatif, tellement faible, que la destruction du doublage serait de beaucoup réduite, sans que des coquillages, etc., s'attachassent aux bâtimens. M. Ed. Davy a conservé des câbles de vaisseau dans l'eau de mer, en les joignant à un morceau de zinc. M. le capitaine Borne a proposé, il y a long-temps, de conserver par le même procédé les boulets, etc.

425. *Pouvoirs conducteurs.* Il n'y a guère que les métaux et le charbon qui conduisent bien le courant galvanique.

Davy a établi deux lois sur la conductibilité des métaux ; savoir :

1° La conductibilité des fils de même diamètre et d'un même métal est en raison inverse de leurs longueurs, et en raison directe des aires de leurs sections, ou des carrés de leurs diamètres.

Ainsi, deux fils d'un même métal auront la même conductibilité, si entre leurs poids et leurs longueurs on a la relation $\frac{P}{P'} = \left(\frac{l}{l'}\right)^2$. En effet, cette équation revient à $\frac{\pi r^2 l d}{\pi r'^2 l' d} = \left(\frac{l}{l'}\right)^2$ ou $\frac{\pi r^2}{\pi r'^2} = \frac{l}{l'}$.

La conductibilité d'un métal croît donc avec la masse, et non avec la surface ; d'où il suit que l'électricité en mouvement pénètre dans l'intérieur des corps.

M. Becquerel a confirmé ces lois par un procédé plus exact que celui qu'a suivi le physicien anglais.

Il a trouvé qu'une aiguille aimantée, soumise à l'action de deux courans opposés, passant par deux fils du même métal, égaux en diamètre et en longueur, reste stationnaire. Elle n'est pas déviée non plus par l'action réunie d'un fil d'une certaine longueur, et de deux fils d'une longueur double, dont le courant est en sens inverse de celui du premier. M. Pouillet, M. Ritchie, M. Peltier ont été conduits par leurs expériences à nier ces lois.

Il faut faire en sorte que la température des métaux sur lesquels on expérimente soit la même.

Le tableau suivant est extrait du Mémoire de M. Becquerel (*Ann. Ch. Phys.*, t. 32, p. 42).

	Pouvoirs conducteurs.		Pouvoirs conducteurs.
Cuivre	100	Platine	16,40
Or	93,60	Fer	15,80
Argent	73,60	Plomb	8,30
Zinc	28,50	Mercure	3,55
Étain	15,50	Potassium	1,33

Les résultats tirés des expériences de H. Davy ou de M. Pouillet ne sont pas tout-à-fait d'accord avec ces nombres. L'ordre de conductibilité pour l'électricité diffère de celui que nous avons donné pour la chaleur.

M. Pouillet a reconnu que la présence d'une très petite quantité de matière étrangère a une grande influence sur la conductibilité. Ainsi l'or à 750 possède un pouvoir conducteur égal à 100, celui de l'or fin étant 623.

La chaleur augmente ou diminue la conductibilité, selon le cas (M. Faraday).

426. *Conductibilité des liquides.* Les dissolutions acides ou alcalines sont les meilleurs conducteurs liquides.

(1) M. Davy observe dans son Mémoire, *Ann. de Ch. et de Phys.*, t. 29, qu'une dissolution concentrée de sel marin attaque moins le cuivre que ne le fait une dissolution étendue ; on explique ainsi, d'après ce qui précède, le fait observé par M. Becquerel, et qui consiste en ce que deux lames de cuivre communiquant entre elles et plongeant, l'une dans une dissolution concentrée, l'autre dans une dissolution étendue de sel marin, s'électrisent, la première négativement, et la seconde positivement.

L'eau pure est un mauvais conducteur; les liquides non métalliques, le brôme, l'acide sulfureux, ne transmettent pas le courant d'une pile même énergique; mélangés avec l'eau, ils deviennent bons conducteurs.

L'acide sulfurique concentré, qui est un conducteur imparfait, devient très bon conducteur par son mélange avec le même liquide.

Suivant M. Faraday, il existe beaucoup de corps qui interceptent l'électricité à l'état solide, et la transmettent dans l'état fluide; ils sont alors décomposés, à moins que l'intensité électrique ne soit faible. Dans ce cas, il y a transmission sans décomposition même pour l'eau et le sulfate de soude, le chlorure de plomb fondu, etc.

Des substances qui ont, par rapport à l'électricité galvanique, une faculté conductrice particulière.

427. M. Erman, de l'Académie de Berlin, a fait sur la conductibilité de certaines substances des expériences dont les résultats sont très curieux.

Si l'on met en contact avec l'une quelconque des extrémités d'une pile isolée, un électroscope très sensible, et que, les feuilles d'or de cet instrument ayant acquis le degré de divergence qui répond à la tension de la pile, on joigne le réservoir commun et l'extrémité opposée par un fil métallique coupé en deux parties que réunit la flamme d'une lampe à alcool, à l'instant l'électroscope acquiert un surcroît de divergence; ce qui prouve que la communication est établie avec le sol.

Si l'on attache aux deux extrémités d'une pile isolée deux fils métalliques, et qu'on les approche jusqu'à ce qu'ils entrent dans la flamme d'une lampe à alcool, la tension reste la même aux deux extrémités, comme on le voit par les électroscopes qu'on y a placés. Tant que l'isolement de la pile a lieu, les électroscopes divergent à peu près comme dans le cas où les fils n'existeraient pas. Mais plonge-t-on dans la flamme un fil métallique en communication avec le sol, l'extrémité positive est déchargée, et la divergence de l'électroscope placé à l'extrémité négative est augmentée.

Il résulte de là que lorsque la flamme d'alcool ne communique qu'avec une extrémité soit négative, soit positive, et avec le sol, elle est conductrice de l'électricité. Si, étant isolée, elle est en communication avec les deux extrémités à la fois, elle agit comme corps non conducteur. Enfin, si elle est en communication avec le sol, en même temps qu'elle réunit les deux extrémités, elle fait fonction de corps isolant relativement au fluide négatif, et celle de corps conducteur relativement au fluide positif.

Un prisme de savon desséché se comporte de la même manière, avec cette différence qu'il décharge l'extrémité négative.

M. Erman a reconnu des propriétés analogues dans la flamme de phosphore, la gélatine desséchée, l'ivoire, etc.

428. Il serait très important de connaître l'état réciproque dans lequel les différens corps peuvent se mettre par le contact. Les expériences ne sont pas assez multipliées pour qu'on puisse donner une table complète. En attendant, nous rapporterons celle que nous trouvons dans l'ouvrage de M. Berzélius.

Dans cette table, chaque corps est positif à l'égard de ceux qui le précèdent, et négatif à l'égard de ceux qui le suivent.

Or.	Cobalt.
Iridium.	Bismuth.
Rhodium.	Étain.
Platine.	Plomb.
Palladium.	Fer.
Mercure.	Cadmium.
Argent.	Zinc.
Cuivre.	Manganèse.
Nickel.	

Cette table est déduite de considérations chimiques; une pareille table ne présente rien d'absolu, puisque l'état électrique peut être interverti par le changement de l'agent excitateur.

Phénomènes thermo-électrodynamiques.

429. M. le professeur Seebeck, membre de l'Académie de Berlin, a découvert, en 1822, qu'on peut établir un courant électrique dans les métaux sans l'interposition d'aucun liquide. L'expérience est fort simple. Soudez deux arcs de métaux différens, par exemple de cuivre et de bismuth, de manière à former un cercle fermé. La forme circulaire n'est pas indispensable; il suffit que les deux métaux composent ensemble un circuit, c'est-à-dire un anneau continu d'une figure quelconque. Pour établir le courant électrique, chauffez l'anneau à l'une des soudures; l'électricité positive dans la partie non chauffée se dirigera du cuivre vers le bismuth (*fig.* 263).

L'existence de ces courans se constate au moyen de l'aiguille aimantée (*Ann. de Ch. et de Phys.*, t. 22, p. 199).

Le même savant a déterminé des courans de ce genre dans des circuits formés par un seul métal; mais ces expériences ne réussissaient qu'avec des métaux qui ont une texture cristalline; en sorte que les diverses parties d'un cristal paraissent jouer alors le rôle de métaux différens. Une légère différence, comme celle de la trempe pour l'acier ou de la cohésion, suffit aussi pour établir un circuit thermo-électrique. M. Becquerel est parvenu à exciter des courans dans tous les métaux, même

dans le platine, l'argent, etc. M. Yelin a constaté qu'un barreau de zinc, chauffé à un de ses points, dévie l'aiguille aimantée.

Il résulte des recherches de MM. Fourrier et Œrsted (même vol., p. 375), que les effets thermo-électriques peuvent être augmentés par la répétition alternative des barreaux de diverses matières. Si l'on chauffe les soudures alternatives, et qu'on refroidisse les soudures intermédiaires, l'effet augmente encore.

Il suit de là que, pour former des circuits complexes capables de produire un grand effet sur l'aiguille aimantée, on sera obligé de se servir d'élémens très courts. Enfin, l'effet d'un circuit complexe est beaucoup moindre que la somme des effets isolés que peuvent produire les mêmes élémens employés à former des circuits simples.

La puissance de l'appareil thermo-électrique augmente avec le nombre des élémens, et diminue avec l'accroissement de la longueur de ces élémens, mais dans un moindre rapport.

430. On peut interrompre le circuit et réunir les barres par un fil métallique d'une nature différente, de cuivre par exemple, sans affaiblir les effets d'une manière sensible; un fil de platine convient beaucoup moins bien; enfin, quand le corps interposé est une bande de papier mouillé avec une dissolution de soude, on n'observe aucun effet appréciable.

Le courant thermo-électrique doit produire les décompositions qu'opère une pile faible de Volta. C'est ce qui résulte des expériences de M. Becquerel et de M. Botto.

431. M. Cumming a établi par ses recherches le tableau suivant, dans lequel chaque corps est positif avec ceux qui le suivent et négatif avec ceux qui le précèdent.

Bismuth.	Argent.	Zinc.
Mercure.	Étain.	Charbon.
Nickel.	Plomb.	Plombagine.
Platine.	Rhodium.	Fer.
Palladium.	Laiton.	Arsenic.
Cobalt.	Cuivre.	Antimoine.
Manganèse.	Or.	

M. Sturgeon a reconnu que la présence d'un métal étranger modifie singulièrement l'énergie d'un métal; ainsi le bismuth et l'antimoine perdent presque toute leur puissance thermo-électrique par leur combinaison avec un peu de plomb ou d'étain.

On a déjà fait plusieurs applications importantes de la découverte de Seebeck.

432. Si l'on chauffe une des soudures d'un circuit formé par un fil de cuivre et un fil de fer, l'énergie électrique croît de 0 à 140°, de la même quantité pour chaque accroissement égal de température. A partir de 140°, l'effet de la température devient beaucoup moindre, et à 300° il est à peine sensible. Plus loin, l'effet devient nul, et, enfin, il change de signe (M. Becquerel, *Ann. de Ch. et de Phys.*, t. 35, p. 125).

M. Peltier, en plongeant l'une des soudures d'un semblable appareil dans un lieu profond, un puits par exemple, en même temps qu'il plonge l'autre extrémité dans un seau d'eau, détermine la température du premier lieu. Pour cela, il fait varier la température de l'eau du seau jusqu'à ce que le fil soit sans action sur le galvanomètre; alors les deux soudures sont à la même température. On a donc la température du puits, MM. Becquerel et Breschet (*Ann. de Phys.*, tome 59) ont employé à la recherche de la température des divers organes de l'homme et des animaux un appareil consistant en une aiguille formée par la réunion de deux aiguilles très fines. Cette aiguille composée est introduite dans l'organe dont on désire la température. Il est bien entendu que l'extrémité extérieure de chaque aiguille communique avec une des extrémités d'un fil du multiplicateur, et qu'on a gradué cet instrument sur un bon thermomètre à mercure.

M. Nobili (*Biblioth. univ. de Genève*, t. 44, p. 225.) a imaginé un appareil auquel il a donné le nom de thermo-multiplicateur. Cet appareil se compose d'une boîte cylindrique, renfermant une pile thermo-électrique, formée de bismuth et d'antimoine. Chaque extrémité de la pile est terminée par un appendice en cuivre, destiné à établir la communication avec le fil du galvanomètre.

Toutes les jointures impaires 1, 3, 5, etc., sont libres, tandis que les jointures paires 2, 4, 6..., sont couvertes de mastic; en sorte que si l'on place cet appareil sous une machine pneumatique, et qu'on raréfie l'air, les premiers seulement auront le contact de l'air froid, et l'instrument marchera beaucoup plus rapidement que le thermomètre de Breguet. M. Nobili, en noircissant les soudures libres pour les rendre plus propres à l'absorption de la chaleur rayonnante, a constaté que les diverses parois d'une chambre n'ont pas la même température. Si l'on ajoute un réflecteur conique du côté des soudures libres, la sensibilité augmente encore.

M. Melloni a régularisé cet instrument en le graduant de manière à en rendre la marche comparable. Il en a augmenté l'importance en l'employant à des recherches ingénieuses sur la chaleur rayonnante, dont nous avons rapporté les principaux résultats.

Graduation. Une lampe, placée à l'ouverture des soudures paires, produit un certain effet, par exemple une déviation de 50° à droite; on couvre ces soudures, le galvanomètre revient à 0. On expose les soudures impaires à une seconde lampe; l'effet est par hypothèse 49°, à gauche, la différence est de 1°. Puis on laisse les deux côtés de la pile libres, afin que les deux lumières, restées dans la même position, puissent agir à la fois; on observe que le galvanomètre marche de 7° à droite. Ainsi 1° de 49 à 50 vaut 7° de 0 à 7°. En appro-

chant ou en éloignant les lumières, on pourra former une table qui contiendra les valeurs des différens degrés de l'échelle de l'instrument. Exprimées par les premiers, il faut remarquer que les dix premiers peuvent être considérés comme égaux (*An. de Ch. Phys.*, année 1834).

Phénomènes thermo-électro-statiques (1).

433. Certains minéraux acquièrent, à l'aide de la chaleur, la vertu électrique. La distribution de l'électricité dans un minéral ainsi électrisé, offre quelque ressemblance avec la distribution du magnétisme dans les aimans. Nous indiquerons la tourmaline comme la substance la plus propre à constater le développement de l'électricité par la chaleur.

Si, après avoir fixé un prisme de tourmaline à une pince, on le présente à la chaleur d'une bougie, l'électricité naturelle de la substance est décomposée; de manière que l'électricité positive se manifeste à un sommet de l'axe, et l'électricité négative au sommet opposé. L'effet ne croît pas avec la température.

434. Une tourmaline ayant acquis des pôles par une certaine élévation de température, les perd si on la laisse se refroidir, et se met, pendant le refroidissement, dans un état opposé, c'est-à-dire que le côté positif devient négatif, et réciproquement (Bergmann, Canton).

Il est important de remarquer qu'il ne suffit pas de chauffer une tourmaline pour l'électriser, mais qu'il faut *en faire varier la température*. Ainsi une pierre de ce genre, maintenue pendant une demi-heure à la température de l'eau bouillante, ne s'électrise pas d'une manière sensible (Canton, Priestley). M. Becquerel, en mettant une tourmaline en communication avec les pôles d'une pile sèche, a vu que si on laisse la température *stationnaire* un instant, la polarité électrique disparaît sur-le-champ.

Dans tous les cas, le minéral reprend son état naturel par son retour à la température primitive.

Pour reconnaître les deux pôles d'une tourmaline électrisée, on lui présente un très petit pendule non électrisé; il est attiré par les deux bouts. Le milieu du minéral est dans l'état naturel; aussi est-il sans action sur le pendule. Si d'avance on donne au pendule une électricité connue, celui-ci sera repoussé par un pôle et attiré par l'autre.

Deux tourmalines électrisées s'attirent par les deux pôles de nom contraire, et se repoussent par les pôles de même nom. L'appareil qui sert à constater ces effets se compose d'un support en cuivre terminé par une pointe d'acier très aiguë, et d'une lame du même métal, relevée en équerre à échancrures (*fig.* 261). Cette lame est percée dans son milieu d'une cavité circulaire destinée à recevoir une petite chape d'agate. L'une des deux tourmalines est placée sur cette lame; on présente alternativement à chacun de ses pôles les pôles d'une autre tourmaline qu'on tient à l'aide d'une pince, et l'on vérifie ainsi l'énoncé de la proposition.

Ces expériences réussissent très bien, même dans les temps les plus humides, à raison du peu de conductibilité de la tourmaline.

435. Si l'on casse une tourmaline électrisée, chaque fragment, quelque petit qu'il soit, a deux pôles électriques comme la tourmaline entière (Canton). Ce résultat est analogue à celui que présentent les aimans (*voyez* ces derniers).

Un fait bien singulier, c'est qu'une tourmaline échauffée par une de ses extrémités, paraît ne posséder qu'une espèce d'électricité dans toute sa longueur; ce fait, annoncé par d'anciens physiciens, a été encore confirmé par M. Becquerel. A mesure que l'autre partie de la tourmaline s'échauffe par communication, elle se charge de plus en plus d'une électricité opposée à celle qui s'est manifestée dans la partie chauffée directement (*Ann. de Ch. et de Phys.*, t. 37, p. 13).

Nous avons toujours cité la tourmaline, parce que cette substance a été le sujet de nombreux essais, et parce qu'elle se prête aux expériences beaucoup mieux que les autres substances pyro-électriques (1).

436. On avait pensé que les cristaux qui jouissent de la propriété d'être électrisés par la chaleur dérogeaient à la loi de symétrie que présentent ordinairement les substances cristallisées, et que les parties dans lesquelles résident les deux espèces d'électricité, quoique semblablement situées aux deux extrémités du cristal, différaient par leur configuration.

Mais des expériences récentes montrent que des substances dont la cristallisation est régulière, s'électrisent par la chaleur, et que conséquemment il n'existe aucune corrélation entre la forme et la vertu pyro-électrique; il sera peut-être reconnu par la suite que tous les corps sont pyro-électriques.

437. Lemery (*Acad. des Sciences*, 1717) a le premier (2) fait mention du développement de l'é-

(1) Il ne faut pas confondre ces phénomènes avec ceux dont il vient d'être question.

(1) M. Becquerel, tome cité, p. 336, a remarqué qu'un échauffement ou un refroidissement brusque convient mieux qu'un échauffement ou un refroidissement lent, et que les tourmalines varient beaucoup sous le rapport de la facilité à être électrisées. Le même physicien rapporte un fait fort curieux observé par M. Ajasson, et qui consiste en ce qu'une tourmaline qui ne manifestait aucun signe d'électricité, quoiqu'elle changeât de température, acquit des pôles par sa rupture en deux parties.

(2) Depuis long-temps on connaît aux Indes-Orientales, et surtout à l'île de Ceylan, la propriété qu'a la

lectricité par la chaleur. Canton, Wilson, Priestley, Bergman, Æpinus, Haüy, l'ont successivement constaté dans différens minéraux. M. Brewster vient d'augmenter la liste des minéraux électriques par la chaleur; il a même reconnu qu'un grand nombre de produits artificiels, et que plusieurs substances simples, jouissent de la même propriété (*Ann. de Ch. et de Phys.*, t. 28).

Les principales substances électriques par la chaleur sont :

La tourmaline.	Le soufre natif.
La topase.	L'acide tartrique.
Le spath calcaire.	Le tartrate de potasse et de soude.
Le sulfate de baryte.	Le carbonate de potasse.
Le diamant.	Le sulfate de fer.
L'orpiment.	Le sucre.
Le quartz du Dauphiné.	L'acide citrique.

De l'Électricité développée dans les phénomènes chimiques.

438. Les premières expériences sur le développement de l'électricité dans les phénomènes chimiques sont généralement attribués à Lavoisier et Laplace. Ces illustres savans observèrent, avec Volta, que dans la dissolution du fer ou du zinc par l'acide sulfurique et dans la combustion du charbon, il y a développement d'assez d'électricité pour charger un condensateur, au point de donner des étincelles (*Journ. de Phys.*, t. 22, année 1782).

Sir H. Davy a fait, en 1807, de nombreuses expériences sur l'électricité développée dans le contact des corps et dans les actions chimiques. Il en résulte que certaines combinaisons et surtout celles qui se font avec un grand dégagement de chaleur, développent de l'électricité.

La découverte du multiplicateur de Schweigger, instrument capable de rendre sensibles les plus petits développemens d'électricité, et que nous ferons connaître par la suite, a fourni à MM. Avogadro, Œrstedt, Becquerel, etc., un secours qui avait manqué aux savans que nous venons de citer.

M. Avogadro, en Italie, a reconnu qu'on peut établir un courant électrique dans un seul métal, par l'action d'un acide; il suffit pour cela de ne pas plonger en même temps dans cet acide les deux extrémités du métal. L'expérience réussit surtout très bien avec le zinc ou le fer et l'acide sulfurique ou hydrochlorique, étendu d'eau (année 1821).

M. Becquerel, en France, M. Nobili, en Italie, ont fait avec beaucoup de soin l'étude d'un grand nombre de combinaisons chimiques, au moment même de leur formation. Il paraît bien établi maintenant que dans la combinaison d'un acide ou d'un oxide avec un alcali, il y a développement d'électricité.

Pour faire ces expériences d'une manière commode, on prend un multiplicateur dont le fil est en platine; à l'une des extrémités on fixe une petite cuillère aussi en platine, destinée à recevoir l'acide; à l'autre extrémité est une pince du même métal, entre les branches de laquelle on place le corps qui doit agir sur l'acide.

Si l'épreuve est faite avec un acide et un alcali, il s'établit dans le fil du multiplicateur un courant dans lequel l'électricité positive est portée de l'acide à l'alcali. Si l'on remplace l'alcali par un métal, le courant part toujours de l'acide (M. Becquerel, *Ann. de Ch. et de Phys.*, t. 35, p. 113).

(*Voyez* plusieurs mémoires de M. Becquerel, *Ann. de Chim. et de Phys.*, t. 23, 24, 25, 26, 27, 28.)

M. Pouillet vient de mettre hors de doute l'électricité développée dans la combustion du carbone, du gaz hydrogène, des graisses, des huiles, etc. Dans ces expériences, l'oxigène est chargé d'électricité positive et le corps combustible de l'électricité négative. Ce physicien a de plus avancé que la décomposition de l'acide carbonique par les parties vertes des végétaux est accompagnée de dégagement d'électricité. Ce dernier fait nous semble une conséquence de tout ce qui est prouvé aujourd'hui, seulement il est difficile de le constater, à cause de la faible intensité du phénomène.

Deux plaques de métaux différens plongées dans un acide produisent une étincelle quand on les rapproche (M. Faraday) (*Ann. de Chim. et de Phys.*, t. 35).

439. M. Becquerel, en faisant agir des électricités faibles sur des mélanges convenablement choisis, a déterminé la production d'un grand nombre de composés que n'aurait produits ni l'affinité chimique seule, ni une électricité énergique. Il a voulu mettre ainsi les molécules en contact pour ainsi dire une à une, en sorte que les composés même ceux qui sont insolubles, peuvent prendre dans cette production lente les formes cristallines qu'ils ont dans la nature.

M. Becquerel a employé particulièrement deux procédés :

Premier procédé. Pour obtenir des cristaux de protoxide de cuivre, par exemple, on prend un tube de verre fermé à l'une de ses extrémités, et au fond duquel on met du deutoxide de cuivre; on remplit ce tube d'une dissolution saturée de nitrate de cuivre, puis l'on y plonge une lame de cuivre, qui touche aussi le deutoxide, et l'on ferme le tube hermétiquement. Au bout d'une dizaine de jours, on aperçoit sur la lame de cuivre de petits cristaux cubiques ou octaédriques d'un brillant métallique. Voici comment M. Becquerel explique ce phénomène : le deutoxide, par son action sur le nitrate, passe à l'état de sous-nitrate; la partie supérieure de la dissolution ne pouvant être déplacée que difficilement, la lame de cuivre se

tourmaline d'attirer les cendres quand on la jette sur le feu (*Hist. de l'Élect.*, t. 11, p. 139). Ce n'est cependant que depuis 1717 que ce sujet a fixé l'attention des savans.

trouve plongée dans deux dissolutions de nitrate à différens degrés de concentration, circonstance qui suffit pour déterminer un courant, puisque, ces deux dissolutions agissant l'une sur l'autre, donnent lieu à un dégagement d'électricité tel, que la plus concentrée prend l'électricité positive. La portion de la lame de cuivre qui n'est pas en contact avec le deutoxide se trouve être le pôle négatif, et doit attirer le cuivre ou ses oxides, suivant l'énergie du courant; rien ne s'oppose donc à ce que le protoxide s'y dépose, et comme les actions sont lentes, les molécules ont le temps de s'arranger suivant les lois de la cristallisation. A la fin de l'expérience, il ne reste plus dans la dissolution que du nitrate d'ammoniaque, ce qui prouve que de petites portions d'eau et d'acide nitrique ont été décomposées.

Deuxième procédé. M. Becquerel se sert de plusieurs appareils; mais voici celui qu'il considère comme pouvant servir dans tous les cas, quoiqu'il en emploie ordinairement de plus simples.

Trois bocaux en verre *A*, *A'*, *A''* (*fig.* 296), sont rangés sur la même ligne, à peu de distance les uns des autres, le premier est rempli d'une dissolution de sulfate ou de nitrate de cuivre, le second d'une dissolution de la substance sur les parties constituantes de laquelle on veut opérer des changemens, et le troisième d'eau rendue légèrement conductrice de l'électricité par l'addition de sel marin. *A* communique avec *A'*, au moyen d'un tube recourbé *a b c*, rempli d'argile humectée d'une dissolution saline, dont la nature dépend de l'effet qu'on désire produire dans *A'*; *A'* et *A''* communiquent ensemble par l'intermédiaire d'une lame de platine ou d'or *a' b' c'*. *A* et *A''* sont réunis au couple voltaïque *c M s*, composé d'une lame de cuivre et d'une de zinc. Enfin des tubes de sûreté *t t* et *t' t'*, placés dans les bocaux, servent à indiquer les pressions intérieures. L'extrémité *c'* de la lame de platine se trouve être le pôle positif d'une petite pile dont l'action est lente et continue; l'intensité du courant est suffisante pour décomposer le sulfate de cuivre; l'oxigène se rend vers *c'*, ainsi que l'acide sulfurique, qui, en passant dans le tube *a b c*, chasse les acides qui ont moins d'affinité que lui pour les bases: tous les élémens qu'on a chassés se rendent avec l'oxigène dans le bocal *A'*, où leurs réactions lentes déterminent divers changemens.

C'est avec un appareil ainsi disposé, que M. Becquerel est parvenu à obtenir cristallisés des chlorures et des iodures doubles, des sulfures métalliques, des sulfates terreux, des carbonates, etc., etc.

Des expériences de ce genre sont propres à jeter beaucoup de lumière sur la manière dont se sont produits ces cristaux de matières insolubles, qu'on trouve en quantité si considérable dans les couches qui forment la surface du globe. (Voy. *Ann. de Chim. et de Phys.*, t. 41 et 43).

M. Becquerel a encore constaté que pendant l'ascension d'un liquide dans un corps poreux, il y a développement d'électricité.

440. Il résulte de ce qui précède que l'électricité doit se décomposer et se recomposer sans cesse à la surface et dans l'intérieur du globe, par le contact, la pression, le frottement, etc., des substances hétérogènes, par les variations de température, par les phénomènes chimiques, et en général par le déplacement des molécules des corps.

441. M. Léop. Nobili (*Ann. de Chim. et de Phys.*, t. 37, p. 260) est parvenu, au moyen du courant voltaïque, à produire sur ces plaques métalliques des dessins réguliers teints de couleurs très vives. Le procédé de ce physicien consiste à placer chaque plaque dans un vase contenant une dissolution saline, un acide organique ou inorganique, un acide animal ou végétal, à faire communiquer la plaque avec l'un des pôles de la pile et à placer perpendiculairement l'extrémité du fil qui communique avec l'autre pôle, à une demi-ligne de distance du centre de la plaque: le dernier fil est terminé par une pointe en platine; l'effet est souvent produit en quelques secondes, même avec une pile de douze élémens d'un pouce carré. Nous citerons une expérience. La dissolution est un mélange de nitrate de potasse et d'acétate de cuivre; la plaque est en argent; le centre de la plaque conserve son brillant métallique; autour du centre on observe une série de cercles concentriques dans l'ordre suivant: deux petits cercles d'un vert peu chargé, un blanc, un rouge, un verdâtre, et une zône de cuivre d'un beau rouge de feu. Cette zône est environnée d'un cercle azuré marqué de lignes rayonnantes comme le serait un cercle gradué, ces lignes jusque sur le cercle de cuivre; au delà vient une seconde zône cuivrée, plus large que la première, mais également brillante, entourée d'un cercle d'un beau vert qui termine la figure. Sur l'or et sur le platine mêmes apparences. Il est important pour le succès de l'expérience que les lames ne soient pas très polies.

M. Bonyol de Genève a obtenu des effets analogues, soit avec la pile, soit avec l'électricité ordinaire.

MAGNÉTISME (1).

442. On a donné le nom d'aimant à un minéral qui jouit de la propriété d'attirer le fer, le cobalt et le nickel (2). Ce minéral n'est autre chose que de l'*oxide intermédiaire de fer*. Presque toutes les mines de cet oxide sont des aimans naturels.

Les trois métaux que nous venons de citer peuvent devenir des aimans artificiels. Cette propriété est-elle générale, ou est-elle le partagé de ces trois corps? C'est ce que nous discuterons à la fin du Magnétisme.

Propriétés générales des Aimans.

443. 1° Quand on roule un aimant dans de la limaille de fer et qu'on l'en retire ensuite, on la voit s'attacher inégalement aux diverses parties de sa surface. On donne le nom de pôles aux deux points opposés sur lesquels la limaille s'est fixée en plus grande abondance (*fig.* 274). On appelle *ligne moyenne* la partie *c d* à laquelle il ne s'attache point de limaille, et qui est conséquemment dans l'état naturel.

2° L'action magnétique s'exerce à distance, et même à travers le vide.

3° La vertu magnétique se fait sentir indifféremment à travers toutes les substances conductrices ou non conductrices de l'électricité.

4° L'isolement n'est pas nécessaire à la conservation du magnétisme. Le contact des substances étrangères ne fait rien perdre aux aimans.

5° Un aimant abandonné à l'action seule du globe et libre de se mouvoir dans un plan horizontal, prend toujours, en Europe, une direction peu différente de celle du méridien. On appelle *déclinaison* l'angle que forme l'aiguille avec le méridien terrestre ou astronomique, lequel est, comme on sait, un plan vertical passant par le lieu de l'observation et par les deux pôles de la terre. Une aiguille libre de se mouvoir dans tous les sens prend une position inclinée à l'horizon dans le plan de l'aiguille horizontale. L'angle formé par la direction de l'aiguille avec l'horizon s'appelle l'*inclinaison*. (Voyez *Inclinaison*.)

6° Lorsque plusieurs aiguilles aimantées sont libres dans un plan horizontal, celles de leurs extrémités qui se tournent vers le même pôle du globe doivent nécessairement posséder le même magnétisme. On observe d'ailleurs que ce sont celles qui, dans l'aimantation, ont été en contact avec un même pôle. Approchées les unes des autres, elles *se repoussent* mutuellement. Au contraire, il y a *attraction* entre les extrémités qui ont reçu des *magnétismes différens*. De plus, lorsqu'on présente le pôle d'un aimant à une aiguille aimantée, libre dans un plan horizontal, celle-ci est sollicitée par les deux pôles, mais elle obéit à celui des deux dont elle est le plus rapprochée; de sorte que l'aiguille tourne vers le pôle de l'aimant le plus rapproché son pôle de nom contraire, et si, lorsqu'elle a pris une position fixe, on l'en détourne, elle y revient par une suite d'oscillations.

L'action du globe est tout-à-fait semblable à celle de l'aimant. Une aiguille aimantée revient toujours dans le méridien magnétique, et tourne le même pôle vers le même point du globe. On a tiré de là la dénomination des deux magnétismes. On a appelé *boréal* celui qui domine dans la partie boréale du globe, et *austral* celui qui domine dans l'hémisphère austral. On peut donc considérer l'extrémité d'un aimant qui se dirige vers le sud, comme le pôle boréal, et l'extrémité qui se dirige vers le nord, comme le pôle austral. Mais quand nous dirons *extrémité boréale* nous entendrons l'extrémité dirigée vers le nord.

7° Dans un point quelconque du globe, dans l'intérieur des mines, au sommet des plus hautes montagnes, l'aiguille aimantée prend toujours, dans le même temps, une direction déterminée.

8° L'aimantation ne change pas les dimensions des corps. Une expérience de M. Gay-Lussac rend cette vérité palpable; un cylindre d'acier plein d'eau auquel ce savant académicien avait adapté un tube capillaire, en partie plein d'eau, conserva la même capacité après qu'avant l'aimantation. Nous avons

(1) Magnétisme, de μαγνης, aimant.
(2) Le manganèse est magnétique lorsqu'il est porté à une basse température. (M. Pouillet.)

déjà vu (n° 352... 5°) que l'électricité se comporte de la même manière.

9° L'aimantation peut être déterminée à distance. Si l'on présente un petit barreau d'acier, suspendu par un fil flexible, à l'action d'un des pôles d'un aimant, il acquerra des pôles; cette expérience pourra se répéter un grand nombre de fois, sans que la puissance de l'aimant soit diminuée.

10° Un fil de fer pur reprend bientôt son état naturel (1); un fil *d'acier*, au contraire, et surtout lorsqu'il est fortement *trempé* (2), conserve sa vertu magnétique pendant un temps très long. L'acier n'est autre chose que du fer uni à quelques millièmes de charbon. L'oxigène, le soufre, le carbone, l'antimoine, etc., donnent au fer, au nickel et au cobalt la propriété de conserver plus longtemps la vertu magnétique. Ces métaux cessent d'être magnétiques si on les combine avec un excès de substance étrangère. Ainsi le peroxide, le persulfure de fer ne sont pas magnétiques.

11° A une température élevée, à celle du rouge-blanc, par exemple, les barreaux aimantés perdent leurs pôles, c'est-à-dire qu'ils sont remis dans l'état naturel; il faut avoir soin de les tenir dans un plan perpendiculaire au méridien magnétique, sans quoi ils s'aimanteraient par l'influence du globe, en se refroidissant, et présenteraient des pôles après le refroidissement (Gilbert). Ce qui est beaucoup plus singulier, c'est qu'à cette même température, les métaux magnétiques deviennent insensibles à l'action des aimans (M. Barlow de Woolvich). Les expériences de Coulomb, de M. A. F. Kupfer, etc., montrent bien que l'intensité magnétique d'une aiguille aimantée diminue à mesure que la température s'élève; de plus, que l'aimant, revenu à sa température primitive, ne reprend pas toute l'intensité magnétique qu'il avait avant d'être échauffée (*Ann. de Chim. et de Phys.*, t. 30, p. 113); mais la relation entre le changement de température et le changement d'intensité magnétique n'est pas encore complètement connue. Néanmoins, on peut ramener les résultats des expériences à une même température. M. Harris prétend qu'une aiguille qui a été exposée d'abord à la température de cent degrés n'éprouve plus de variations dans son intensité, lorsqu'on la soumet à des températures inférieures.

Le froid, même très grand, ne détruit pas la puissance magnétique.

Loi des Actions magnétiques.

444. Lambert (*Acad. de Berlin*, 1766) avait vu que l'hypothèse d'une intensité réciproque au carré de la distance satisfaisait à ses expériences et à celles de Muschenbroch. Coulomb a démontré par des expériences directes que cette hypothèse est la véritable loi.

Ce grand physicien est parvenu à ce résultat important par deux méthodes différentes. Pour mettre la première en pratique, il est nécessaire de connaître la manière dont le globe agit sur un aimant horizontal écarté du plan magnétique. A cet effet, on détermine d'abord la direction du plan magnétique par le moyen d'une bonne aiguille aimantée. On attache au fil de suspension de la balance de torsion (n° 338) un étui *a b* (*fig.* 265), destiné à recevoir le barreau aimanté, et, afin de donner toujours à celui-ci la même position, la plaque horizontale de l'étui est revêtue en dedans d'une couche de cire molle, sur laquelle on prend l'empreinte du barreau aimanté.

On commence par placer dans l'étui une aiguille d'une matière non magnétique, et on tourne le micromètre jusqu'à ce qu'elle se tienne en repos vis-à-vis du zéro de la division : alors on dispose tout l'appareil de manière que l'aiguille, correspondant toujours à zéro, soit dans le plan magnétique, et l'on y substitue le barreau aimanté. Celui qui a servi aux expériences de Coulomb avait 24 pouces de longueur, et 1 ligne 1/2 de diamètre. Ce physicien a ainsi trouvé les résultats suivans:

Torsion donnée au micromètre supérieur	Angle de déviation où l'aiguille s'est arrêtée.	Nombre de degrés de torsion, ou force de torsion
0 cercle	0°	0°
1	10 1/2	349 1/2
2	21 1/4	698 3/4
3	33	1047
4	46	1394
5	63 1/2	1736 1/2
5,5	85	1895

Ce tableau montre que la force directrice de la terre est proportionnelle aux sinus des angles d'écartement ou aux angles, si ceux-ci sont très petits : ainsi les nombres 1047, 698 3/4, 349 1/2, degrés de torsion, sont proportionnels à 33°, 21° 1/4, et 10° 1/2, angles d'écartement. (*Mém. de Coulomb, Acad. des Sciences.*)

Cela posé, il suffira de connaître le nombre des degrés de torsion correspondant à une distance déterminée, pour en déduire la valeur de la force directrice d'un degré. Coulomb trouva que pour le barreau dont nous avons indiqué les dimensions, 35° de torsion équivalaient à un degré d'écartement.

Coulomb plaça verticalement à côté de cet aimant horizontal un autre aimant pareil; les deux aimans se touchant par les pôles de même nom, il y eut répulsion. Le premier était seul libre de se mouvoir. Voici les résultats de trois expériences :

(1) A moins qu'il n'ait été écroui par la torsion. Des fils de fer tordus gardent le fluide magnétique presque aussi bien que des fils d'acier. (Coulomb.)

(2) L'effet de la trempe n'est bien marqué que sur l'acier.

Angle de répulsion.	Torsion supérieure.
24°	0 cercle.
17	3
12	8

Dans une première expérience, l'aimant horizontal a été chassé à 24°, et s'y est arrêté. La force directrice du globe tendait à le ramener dans le méridien magnétique avec une force égale à 24 × 35 ou 840 degrés. En ajoutant à 840 la torsion du fil qui est ici 24, on a pour force répulsive totale des deux aimans 840 + 24 ou 864 degrés à 24 degrés de distance.

Dans une seconde, l'aiguille faisait un angle de 17 degrés avec le méridien magnétique; l'action du globe était égale à 17 × 35 degrés; la torsion imprimée au fil par le micromètre supérieur était égale à trois cercles ou 360 × 3; enfin la torsion du fil, produite en sens inverse de la première, et qui, conséquemment, devait lui être ajoutée, était 17°; en sorte que la force totale à laquelle la répulsion magnétique faisait équilibre était égale à 17 × 35 + 360 × 3 + 17, ou à 1692 degrés. De même, dans la troisième expérience, on trouverait pour la force totale 12 × 35 degrés; plus 8 cercles, plus 12 degrés ou 3312 degrés.

Dans ces trois expériences, les arcs sont assez petits pour qu'on puisse les confondre avec leurs cordes. Les distances successives sont donc 24, 17, 12.

Les forces répulsives correspondantes sont 864, 1692, 3312. On voit qu'elles sont sensiblement en raison inverse du carré des distances; par exemple, les deux expériences extrêmes donnent $24^2 : 12^2 :: 3312 : 864$.

Des épreuves tout-à-fait semblables faites sur des pôles de nom contraire ont fourni le même rapport.

On ne doit se servir dans ces sortes de recherches que d'aiguilles très longues, afin de pouvoir négliger l'action des deux pôles qui ne sont pas en regard. Le pôle de nom contraire de l'aiguille verticale contrarie par son attraction la répulsion de l'aiguille horizontale; mais, comme le plus grand arc de répulsion n'a été que de 24°, ce qui répondait à une distance de 5 pouces, et que conséquemment l'autre pôle s'est toujours trouvé au moins quatre fois plus éloigné, l'action en était donc seize fois moindre; d'ailleurs cette force était encore affaiblie par l'extrême obliquité de la direction suivant laquelle elle s'exercait. Il faut aussi avoir le soin de n'employer que de l'acier très dur et très fortement trempé, afin que l'action mutuelle des aimans ne puisse développer de nouveau magnétisme pendant la durée des expériences.

445. La seconde méthode consiste à faire osciller une petite aiguille, d'abord sous l'influence de la terre, puis sous la double influence de la terre et d'un aimant placé à diverses distances.

Supposons que la petite aiguille fasse 12 oscillations en 1', et que F soit la force horizontale de la terre qui la sollicite.

On fait agir sur elle le pôle attractif d'une longue aiguille fortement aimantée, d'abord à une distance 1, ensuite à une distance 2.

Supposons que dans le premier cas la petite aiguille fasse N' oscillations par 1', et que F' soit la force horizontale qui agit sur elle; dans le second cas, le nombre des oscillations N'', et la force horizontale F'', on aura les deux équations $\frac{F'}{F} = \frac{N'^2}{(12)^2}$ et $\frac{F''}{F} = \frac{N''^2}{(12)^2}$. (1)

La force horizontale de la grande aiguille est $F' - F$ dans la première expérience, et $F'' - F$ dans la seconde. Ainsi l'on a $\frac{F' - F}{F'' - F} = \frac{N'^2 - (12)^2}{N''^2 - (12)^2}$. Si l'on met à la place de N' et de N'' les nombres fournis par l'expérience, on trouvera 4 pour le rapport des deux forces; ainsi à une distance double l'intensité magnétique est réduite au 1/4. Pour d'autres distances on trouverait la même loi de décroissement.

446. Nous citerons ici une expérience simple et propre à donner une idée de la manière dont s'exercent les attractions et les répulsions magnétiques; on prend deux barreaux aimantés d'égale force, et l'on présente chacun d'eux successivement à une clef. Elle est attirée, quel que soit le pôle qu'on lui fasse toucher. Si maintenant, quand elle est soutenue par un pôle d'un des barreaux, on fait glisser un second barreau sur le premier, de manière à faire toucher les pôles de noms contraires, aussitôt on la voit tomber.

Des Procédés d'Aimantation.

447. Le choc, la torsion, la décharge électrique, le courant voltaïque, l'action de la terre, peuvent déterminer le développement des pôles dans les substances magnétiques.

Franklin et plusieurs physiciens aimantaient des fils d'acier par la décharge des batteries électriques; mais comme ils obtenaient des effets plus

(1) Nous avons vu à l'article du pendule (n° 24), que la gravité en un lieu déterminé est proportionnelle au carré du nombre des oscillations, faites dans un temps donné. Nous avons fait remarquer (n° 342) que les formules du pendule sont applicables aux oscillations des aiguilles électriques; elles sont de même applicables aux oscillations magnétiques, en sorte que la force d'un aimant ou du globe sur une aiguille qui ne fait que des oscillations d'une faible amplitude, est proportionnelle au carré du nombre des oscillations faites par cette aiguille dans un temps donné.

grands quand les fils étaient placés dans le méridien magnétique, que lorsqu'ils étaient placés dans une situation normale, ils attribuaient l'effet principal à l'action du globe. (Franklin, *Lett.*, 1773.) M. Arago, soit par un courant voltaïque continu, soit par un courant d'électricité ordinaire interrompu, a donné à des aiguilles d'acier un degré de magnétisme bien déterminé; et ce qui prouve que l'aimantation n'est pas le résultat de l'influence du globe, c'est que deux aiguilles, l'une dans le méridien, l'autre dans un plan perpendiculaire, acquièrent un degré de magnétisme sensiblement le même. (*Voyez* les Phénomènes électro-dynamiques.) M. Ridolfi, long-temps après les expériences de M. Arago, est parvenu à produire l'aimantation de l'acier par un courant continu, mais passant par un fil tourné en hélice (1).

L'effet du choc sur un barreau de fer ou d'acier n'est bien sensible que lorsque le barreau se trouve placé dans le méridien magnétique : en sorte que le choc n'est que l'auxiliaire du globe. La torsion comme moyen d'aimantation a été peu étudiée.

Ce qui précède fait concevoir comment tous les outils des forgerons sont dans un état magnétique, comment la foudre intervertit les pôles des boussoles.

Nous ne considérons les procédés suivans que comme des résultats fournis par l'expérience (2).

448. *Méthode de la simple Touche.* Quoiqu'il suffise de mettre un fil de fer ou d'acier en contact avec un aimant pour qu'il acquière un certain degré de magnétisme, cependant on n'obtient par là qu'une aimantation très faible, et il est nécessaire, pour avoir un degré de magnétisme un peu considérable, de faire glisser le barreau aimanté le long de celui auquel on veut en communiquer les propriétés. Cette opération a reçu le nom de *touche ;* on répète la même opération toujours dans le même sens. Supposons que le pôle de l'aimant, en contact avec le barreau, soit le pôle austral; il attirera le magnétisme boréal, et repoussera le magnétisme austral (*fig.* 266).

La friction constamment dirigée dans le même sens détermine un état magnétique plus énergique que le simple contact. Mais, comme le pôle austral agit toujours par répulsion sur le magnétisme austral du barreau, il en résulte qu'il détruit par son mouvement une partie de l'effet produit. Aussi cette méthode n'est-elle jamais mise en pratique quand on désire des barreaux un peu forts. Elle ne fournirait jamais des barreaux aimantés à saturation, c'est-à-dire portés dans cet état où la somme des forces attractives et répulsives du magnétisme libre est égale à la résistance opposée par la force coërcitive de la substance à aimanter. Nous ferons remarquer qu'on tire de la possibilité d'augmenter l'aimantation par la répétition de la friction, cette conséquence que la réunion des deux magnétismes est plus difficile que la séparation.

449. *Méthode de la double Touche.* L'inspection de la *fig.* 272 montre que l'emploi de deux aimans est beaucoup plus avantageux; on les dispose verticalement, de manière que les pôles de nom contraire *A* et *B* se correspondent, et l'on fait glisser chaque aimant dans cette situation en le portant alternativement du milieu à l'extrémité; après un certain nombre de frictions, et lorsque les deux aimans se trouvent au milieu du barreau, on les enlève perpendiculairement à ce barreau. Le résultat de cette opération est de mettre chaque extrémité du barreau dans un magnétisme contraire à celui du pôle de l'aimant avec lequel elle a été en contact.

Il est aisé de voir que les deux aimans se secondent mutuellement; lorsque le pôle *A* de l'aimant *C* se trouve en *m* extrémité du barreau d'acier, il attire au point *m* le magnétisme boréal et repousse le magnétisme austral; l'aimant *D* à l'extrémité opposée *n* produit précisément un effet contraire. Cette méthode a été imaginée par Michelli.

Æpinus pensait qu'on obtenait un avantage réel en inclinant chaque barreau sous un angle de 15 à 20 degrés (*fig.* 273). Mais il paraît que cette méthode d'Æpinus a l'inconvénient de faire naître des points *conséquens*, points dont l'action contrarie l'action principale des pôles extrêmes. On appelle points conséquens (1) les pôles développés entre les deux pôles extrêmes. On reconnaît l'existence de ces points conséquens en présentant au barreau aimanté une des extrémités d'une petite aiguille aimantée, ou en le couvrant de limaille.

Coulomb a remarqué qu'on faisait disparaître cet inconvénient en recommençant toujours la friction à partir du milieu. Quoi qu'il en soit, il nous paraît mieux de tenir les barreaux dans une position verticale. D'ailleurs, nous ne pensons pas qu'on obtînt des points conséquens avec un barreau bien homogène.

La méthode de la double touche fournit des aimans très puissans; cependant il est possible de la rendre encore plus efficace.

Le physicien anglais Knight avait, dès 1745, imaginé un procédé dans lequel il employait aussi le concours de deux aimans pour développer le

(1) M. Savary a récemment étudié ces phénomènes, et a observé un fait fort remarquable, qui consiste en ce que des décharges électriques graduellement croissantes en intensité déterminent successivement l'aimantation en sens inverse, et que des décharges intermédiaires ne produisent aucune aimantation. (*Ann. de Chim. et de Phys.*, janvier et février 1827.)

(2) M. Morichini en Italie, puis Mme de Sommerville à Londres, ont annoncé avoir aimanté de petites aiguilles d'acier par la seule action des rayons violets. Ces expériences n'ont pas réussi à Paris.

(1) On ne conçoit dans l'hypothèse de Coulomb la formation des points conséquens, qu'en admettant que le barreau dans lequel on les observe ne présente pas dans toute son étendue une force coërcitive égale.

magnétisme dans des barreaux d'acier. Il réunissait deux barreaux fortement aimantés par les pôles de nom contraire; il posait ensuite sur ces gros aimans, dans le sens de leur longueur, un petit barreau d'acier trempé au rouge cerise, de manière que le milieu répondît au point de jonction des deux aimans; alors il séparait ceux-ci en les faisant glisser chacun de leur côté jusqu'aux extrémités du petit barreau.

Duhamel en France, Canton en Angleterre (ann. 1751 et 1752, *Phil. Trans.*), ajoutaient aux méthodes précédentes un nouveau degré de perfection. Leur méthode consiste à former un parallélogramme avec quatre barreaux, dont deux sont en fer doux, et deux en acier trempé; ce sont ces derniers qu'il s'agit d'aimanter. Les barreaux d'acier sont parallèles (*fig.* 275).

On aimante d'abord un des deux barreaux par la méthode de la double touche; celui qui est marqué *C D*, par exemple, acquiert des pôles dont la position est indiquée dans la figure. Après un certain nombre de frictions, on retourne le barreau, et l'on répète la même opération sur l'autre face. On fait des frictions pareilles successivement sur les deux faces du barreau *H K*, en observant de renverser les aimans, puisque les pôles du barreau *H K* sont en sens contraire de ceux du barreau *C D*.

Il est visible que l'effet des barreaux de fer doux, dont le magnétisme se développe par le seul contact des aimans, est de maintenir dans les barreaux d'acier soumis à l'expérience, les deux fluides aux extrémités.

On donne encore aux barreaux une autre disposition (*fig.* 281). Le barreau destiné à être aimanté repose sur les deux barreaux de fer doux.

Il serait aussi avantageux d'employer pour barreaux auxiliaires, des barreaux déjà aimantés. Dans ce cas, il est évident qu'il faudrait les placer d'avance dans des positions respectives analogues à celles que représente la figure où les pôles de nom contraire sont en contact (Æpinus). Les barreaux d'acier, aimantés par l'un ou par l'autre de ces procédés, sont ce qu'on appelle des aimans artificiels.

450. On réunit souvent plusieurs barreaux en un seul faisceau (*fig.* 280), en mettant ensemble les pôles de même nom; quelquefois on donne à ces aimans isolés ou réunis en faisceau la forme d'un fer à cheval (*fig.* 282). Le barreau qui occupe le milieu d'un faisceau courbe ou rectiligne dépasse les autres barreaux de quelques lignes. Il est même avantageux de réunir des lames minces, aimantées isolément. Voyez les phénomènes électrodynamiques, pour un procédé fondé sur l'action des courans électriques.

451. *Des Armatures.* Il est asses rare de trouver des aimans qui, au sortir de la mine, manifestent un magnétisme énergique.

L'expérience a appris que la vertu magnétique des aimans se conserve bien et peut même s'accroître quand on les enveloppe de limaille de fer. Ce résultat a fait naître l'heureuse idée des armatures. On nomme ainsi des lames de fer doux qu'on applique sur les faces d'un aimant, et qui, devenant elles-mêmes magnétiques par influence, en augmentent avec le temps l'énergie. La *fig.* 283 représente un aimant avec ses armatures. Chaque armature, *a c d*, a la forme d'une équerre.

Soient *A* et *B* les pôles de l'aimant; chacun de ces pôles agit sur la lame qui lui est adjacente, de manière à attirer le fluide de nom contraire, et à repousser dans le pied *d* de l'armature le fluide de même nom. Il en résulte que chaque pied acquiert le magnétisme du pôle que l'armature touche. D'une autre part, le fluide de l'armature agit à son tour sur l'aimant. C'est de cette combinaison d'actions réciproques, que dépend la propriété que l'armature a d'augmenter la puissance de l'aimant. L'épaisseur à donner aux armatures n'est pas indifférente. Les dimensions convenables ne se trouvent guère que par des essais réitérés. La même figure représente une lame de fer *p r* avec un crochet *s* destiné à supporter des poids.

On charge aussi les aimans artificiels; l'expérience apprend qu'un aimant artificiel ou naturel, ainsi chargé, augmente sa puissance, au point de soutenir un poids double de celui qu'il soutenait d'abord. Il a encore été reconnu que les petits aimans artificiels peuvent supporter des poids proportionnellement plus considérables. Ainsi, des aimans que Coulomb avait faits avec soin, et qui pesaient environ vingt livres, ne pouvaient soutenir que cent livres, c'est-à-dire cinq fois leur poids; tandis que, d'après Ingen-Houz, les petits aimans portent jusqu'à cent fois leur propre poids. Il nous semble que cette différence doit provenir de la plus facile aimantation des petits aimans.

Les aimans naturels présentent un fait asses singulier, dont on n'a pas encore donné d'explication, c'est l'*affaiblissement* qu'ils éprouvent par une *surcharge*. Ainsi un aimant qui, par des charges graduées, pourra soutenir un poids de 20 kilog., tandis que primitivement il ne soutenait que 15 ou 10 kilog., perdra même la puissance de soutenir ce dernier poids, si une surcharge fait détacher le premier. On ne parviendra à lui rendre toute sa puissance qu'en le chargeant d'abord de poids plus faibles que 10 kilog. (*Voyez* les Phén. électrod. pour des aimans d'une grande puissance).

Distribution du Magnétisme.

452. Lorsqu'on roule un barreau aimanté dans de la limaille de fer, on trouve qu'elle s'est attachée aux deux extrémités de l'aimant en quantité considérable, et au milieu en très petite quantité (*fig.* 274). On pourrait donc connaître d'une manière approximative la distribution du magnétisme

dans un aimant, par le poids de la limaille de fer attachée à chacun de ses points.

On se fait encore une idée de la distribution du magnétisme dans un barreau aimanté, en présentant aux différens points de ce barreau une aiguille horizontale; on voit qu'elle est particulièrement agitée lorsqu'elle se trouve en présence des points voisins des extrémités.

La méthode employée par Coulomb pour la même recherche est tout-à-fait simple. Pour la mettre en pratique, on dispose d'abord la balance de torsion de manière qu'une aiguille non aimantée se tienne dans le méridien magnétique, le fil n'ayant subi aucune torsion. Dans la direction du même plan, on place une règle verticale de deux millimètres d'épaisseur, de telle manière que l'aiguille vienne s'y appliquer; à côté de cette règle on fixe un barreau aimanté; on remplace l'aiguille horizontale, non magnétique, par un petit barreau aimanté : les deux barreaux sont placés de manière que les pôles de même nom se trouvent en regard; le barreau horizontal est d'abord chassé à une certaine distance, mais on le ramène en contact avec la règle par une torsion convenable donnée au fil de suspension, à l'aide du micromètre supérieur. On peut considérer cette torsion comme exprimant la répulsion des points voisins : d'abord l'aiguille horizontale étant dans le méridien magnétique, l'action du globe est sans effet; d'un autre côté, les points de l'aiguille verticale qui se trouvent à quelques millimètres au-dessus ou au-dessous du point de croisement ne contribuent pas à la répulsion d'une manière sensible, à cause de leur distance et de l'obliquité de leur action. Il en résulte qu'en faisant glisser l'aimant vertical le long de la règle, de manière à en présenter tous les points à l'action du pôle répulsif de l'aimant horizontal, on aura dans les degrés de torsion qu'il faudra imprimer au fil de suspension, pour maintenir cet aimant horizontal en contact avec la règle, des nombres proportionnels aux quantités de fluide magnétique répandu sur une moitié de cet aimant vertical, et conséquemment sur tout le barreau, puisque les deux moitiés sont semblables.

Quand on fait ces expériences sur des fils aimantés, on trouve que, s'il faut une torsion de 7 à 8 cercles lorsque le point de croisement est à 2 lignes de l'extrémité du fil vertical, il ne faut que deux ou trois cercles de torsion, à 2 pouces; et lorsque l'extrémité de ce fil dépasse de 3 pouces le fil horizontal, la répulsion est presque nulle.

Nous ferons ici l'observation que nous avons déjà faite, lorsque nous avons recherché la loi des actions magnétiques; c'est qu'il ne faut employer que des fils d'excellent acier et fortement trempés, afin que l'état magnétique des deux barreaux ne soit pas changé par leur action réciproque; pour la même raison, il faut avoir l'attention de ne pas leur donner un très fort degré de magnétisme.

453. Coulomb est parvenu à la même détermination par une voie différente.

Cette autre méthode consiste à placer d'abord le fil horizontal dans le méridien magnétique et à compter le nombre d'oscillations qu'il fait dans un temps donné lorsqu'on l'écarte tant soit peu de ce plan. La mécanique apprend que l'action du globe est proportionnelle au carré de ce nombre. Si l'on reprend l'expérience en présentant au fil horizontal un fil vertical semblable, de manière que les pôles de nom contraire soient en regard, si l'on écarte de nouveau le fil horizontal du méridien magnétique, il y reviendra plus rapidement que lorsque le fil vertical n'agissait pas sur lui, parce qu'il s'y trouvera ramené par les actions combinées du globe et du fil. La première de ces forces est connue; si donc l'on retranche le carré du nombre d'oscillations faites par le fil soumis à l'action du globe, du carré du nombre d'oscillations faites par le fil soumis à la double action du globe et du fil vertical, pendant le même temps, ou aura l'action exercée par le fil vertical.

N et N' étant les nombres d'oscillations dans le même temps, faites par le fil horizontal soumis à l'action du globe ou à l'action du globe et à celle d'un point A du fil vertical, N et n' deux nombres correspondans à un point B de ce dernier, on aura $N'^2 - N^2 : n'^2 - N^2$, pour le rapport des intensités magnétiques des deux points.

Le point A situé à la hauteur du fil horizontal (*fig.* 284) sera celui dont l'action se fera sentir davantage, parce qu'il agit directement dans le plan horizontal des oscillations. Les deux points voisins exercent aussi chacun une action : l'une plus faible, l'autre plus forte que celle du point A, de sorte que leur demi-somme lui est sensiblement égale; ainsi, dans chaque expérience, la partie du fil dont l'action sera la plus puissante, exercera une force totale proportionnelle au magnétisme du point A situé dans le plan d'aiguille. A l'extrémité de l'aiguille, où l'accroissement est très rapide, Coulomb double l'effet observé. (Ceci n'est qu'approximatif.)

Le doublement de la force magnétique à l'extrémité ne serait rigoureux qu'autant que, le fil étant prolongé, la distribution du magnétisme serait décroissante à partir de l'extrémité, suivant une loi entièrement semblable à celle qu'on observe sur le fil, comme le fait voir la *fig.* 276. $a\,b$ est le fil métallique, $c\,d$ la courbe dont les ordonnées représentent les intensités magnétiques correspondantes aux diverses abscisses du fil; $a\,b'$ le prolongement du fil, $c'\,d'$ la courbe des intensités supposées décroissantes. Mais comme la distribution du magnétisme est croissante, le doublement doit donner un résultat trop faible. Même dans l'hypothèse d'un décroissement dans l'intensité, le doublement ne serait exact qu'autant que l'aimant vertical aurait son extrémité inférieure au milieu de l'épaisseur de l'aimant.

Résultats obtenus avec un fil de 27 pouces de longueur et de 2 lignes de diamètre.

Distance à l'extrémité boréale du fil d'acier.	Nombres représentant les intensités du magnétisme libre.
0 pouces.	165
1	90
2	48
3	23
4,5	9
6	6

La *fig.* 267 offre la représentation de la distribution magnétique des barreaux aimantés (1).

Action magnétique du globe.

454. 1° Une aiguille aimantée, transportée dans des lieux peu éloignés les uns des autres, conserve sensiblement la même direction. Cela est encore vrai, soit qu'on s'élève dans la verticale, soit qu'on pénètre dans l'intérieur de la terre. Pour commencer à découvrir quelque léger changement dans la direction d'une aiguille aimantée ordinaire, il faut que les points d'observation soient distans de plusieurs lieues. On a conclu de ce fait que la force magnétique du globe peut être censée agir, comme la pesanteur, parallèlement à elle-même, dans les lieux peu éloignés, et que conséquemment toutes les considérations de mécanique relatives à l'équilibre des corps pesans sont appliquables aux corps magnétiques. Il faut seulement se rappeler qu'ils sont à la fois pesans et magnétiques.

On démontre, par le calcul, que l'intensité magnétique du globe en un lieu donné est proportionnelle au carré du nombre d'oscillations faites par une aiguille aimantée dans un temps déterminé. Si une aiguille est portée dans deux lieux différens, et qu'elle fasse N oscillations dans le premier, et N' dans le second, pendant le même temps, on aura : $G : G' :: N^2 : N'^2$, G et G étant les intensités magnétiques du globe dans les deux lieux.

2° L'aimantation d'un barreau d'acier n'en change pas les poids, ce qui prouve que la *résultante verticale* des forces magnétiques *est nulle*.

(1) M. Biot (*Traité de Physique*, t. 3, p. 77) a fait voir que la loi des intensités magnétiques dans un barreau peut être représentée par l'équation logarithmique $y = A\,(\mu^x - \mu^{2\,l - x})$, dans laquelle $2\,l$ désigne la longueur totale du fil aimanté, x la distance de l'extrémité australe au point dont l'intensité magnétique est y.

Pour une aiguille d'une grande longueur, $\mu^{2\,l - x}$ est une fraction négligeable, et l'équation devient alors $y = A\,\mu^x$.

Les deux constantes A et μ sont déterminées par deux observations.

Voyez un mémoire de M. Becquerel, *Ann. de Ch. et de phys*, t. 22, sur la distribution du fluide magnétique dans les fils très fins.

3° Une aiguille aimantée placée sur un flotteur, ou suspendue à un fil de cocon, se dirige dans le méridien magnétique, mais ne prend aucun mouvement ni vers le nord ni vers le sud, d'où l'on conclut que les forces magnétiques horizontales du globe se font équilibre.

4° Un barreau de fer ou d'acier non trempé, mis dans la direction de l'aiguille d'inclinaison, acquiert des pôles en quelques minutes. Ces pôles sont dirigés comme ceux de l'aiguille d'inclinaison. Le renversement du barreau amène le renversement des pôles. On constate l'état magnétique du barreau en présentant le même pôle d'une aiguille aimantée aux deux extrémités de ce barreau; l'aiguille est repoussée par l'une et attirée par l'autre. Si le barreau est de fer doux ou d'acier non trempé, l'aimantation est instantanée, et cesse dès qu'on le soustrait à l'action du globe, c'est-à-dire dès qu'on le place dans un plan perpendiculaire à l'aiguille d'inclinaison. Si ce barreau est en acier trempé, le développement du magnétisme est très lent, mais dès qu'il est produit il se conserve.

Les élémens sur lesquels se porte l'attention des observateurs sont : la *direction* de l'aiguille (déclinaison et inclinaison) et l'*intensité* du globe; les *variations* que les élémens subissent dans le même lieu pendant un court ou un long espace de temps; enfin la *simultanéité* des variations dans des lieux différens.

Déclinaison (1).

455. Nous avons déjà dit que l'aiguille aimantée prend dans le même lieu et dans le même temps une direction déterminée. Nous avons vu (n° 443) qu'écartée du plan magnétique, elle y est ramenée par une force proportionnelle au sinus de l'angle d'écartement.

Si l'on porte l'aiguille successivement sur les différens points du globe, on en rencontre quelques-uns où la direction est celle du méridien du lieu. Dans d'autres elle s'écarte de ce plan, tantôt vers l'occident, tantôt vers l'orient.

On dit que la déclinaison est orientale quand le pôle austral de l'aiguille est tourné vers l'orient.

Il y a plusieurs courbes sur la surface de la terre où la déclinaison est nulle; on les appelle *lignes sans déclinaison*. La position des lignes sans déclinaison n'est pas constante sur le globe, puisque la déclinaison varie avec le temps dans le même lieu. Ainsi, la ligne qui passe maintenant par l'Amérique passait autrefois par Paris et par Londres. Elle a un

(1) Il paraît que les Chinois employaient plus de mille ans avant l'ère chrétienne, la boussole pour se guider sur les continens. L'usage n'en a été un peu répandu que dans le commencement du quatorzième siècle en Europe. Colomb ne connaissait pas la déclinaison avant son départ d'Espagne.

L'inclinaison a été découverte dans le seizième siècle.

mouvement progressif vers l'ouest très considérable. La ligne qui passe près de Kasan offre le même phénomène. Les lignes sans déclinaison ne présentent plus aujourd'hui une grande importance.

Les lignes sans déclinaison sont de deux espèces. Les unes présentent à droite et à gauche la même direction dans l'aiguille aimantée; telle est celle qui passe près d'Irkoustk (Sibérie); les autres offrent une direction différente de chaque côté: telle est la ligne qui passe à l'ouest de Kasan dans la Russie européenne. Les points situés à l'ouest de cette ligne ont une déclinaison occidentale, tandis que ceux qui sont à l'est en ont une qui est orientale. La ligne qui passe au nord de l'Amérique offre le même phénomène dans un sens inverse.

Déclinaisons observées à Paris.

Année	1580.	11° 30′ or.
	1660.	0
	1678.	1° 30′ occ.
	1700.	8° 18′
	1805.	22° 5′
	1819.	22° 29′
	1835.	22° 4′

Le mouvement rétrograde a commencé en 1819 et se maintient. Les observations de M. le colonel Baufoy faites à Londres marchent dans le même sens que celles de M. Arago.

On a admis aussi que l'aiguille aimantée conserve la même direction pendant un certain nombre d'années; ainsi, à Paris, de 1720 à 1824, elle se tint constamment à 13 degrés du méridien. Mais comme à cette époque la variation diurne n'était pas connue, on n'observait pas l'aiguille aimantée comme on le fait aujourd'hui à différentes heures du jour. Il est possible que l'aiguille ait varié dans l'intervalle de 1720 à 1724, sans qu'on s'en soit aperçu.

456. *Variations diurnes.* L'aiguille aimantée est soumise à une variation diurne particulière, dont la marche a été suivie par Graham, Canton, Van Swinden, Cassini...; d'après Cassini, le maximum de la déclinaison diurne a lieu entre midi et trois heures du soir; alors l'aiguille est stationnaire; elle se rapproche ensuite du méridien terrestre jusque vers huit heures du soir; puis elle reste stationnaire pendant toute la nuit. Le lendemain, à huit heures du matin, elle commence à s'éloigner du méridien, et ainsi de suite. C'est entre les mois d'avril et de juillet qu'ont lieu les plus grandes variations diurnes; elles sont à Paris de 13′ à 16′; les plus petites sont de 8′ à 9′. Ces dernières ont lieu dans l'autre partie de l'année.

Des observations faites par Cassini, en 1782, dans les caves de l'Observatoire, c'est-à-dire à 80 pieds au-dessous du sol, profondeur à laquelle les changemens de la température de la surface ne se font plus sentir, montrent que la variation diurne est la même dans l'intérieur de la terre qu'à la surface. Les minimum et les maximum de déclinaison arrivent aux mêmes heures.

L'étendue de la variation diurne n'est pas la même dans tous les pays (1). A Londres elle est, aux mois de juin et de juillet, de 19′ à 20′; et au mois de décembre, elle n'est plus que de 7′ à 8′: la différence est, comme on voit, plus grande qu'à Paris.

M. de Humboldt à Berlin et dans l'Amérique méridionale, M. Kupfer à Kasan, etc., etc., ont constaté aussi la variation diurne.

M. Arago observe depuis plusieurs années, avec le plus grand soin, le même phénomène à Paris.

Les variations diurnes ont, dans les pays septentrionaux, une amplitude plus considérable et présentent moins de régularité que dans les pays méridionaux.

Les variations diurnes se produisent au midi de l'équateur magnétique dans *un ordre inverse*. L'extrémité nord de l'aiguille se dirige vers l'est aux mêmes heures où, dans l'hémisphère boréal, elle marche vers l'ouest. Ce qui résulte des observations de M. Macdonald en 1794 et 1796, à Sumatra et à Sainte-Hélène; de celles de M. Freycinet, en 1818, 1819 et 1820, à l'Ile de France, à Timor, au port Jackson, etc.; de celles de M. Dupérey, en 1822, 1823 et 1824, dans plusieurs points voisins de l'équateur magnétique.

M. Dupérey a reconnu qu'il n'est pas vrai, comme on l'avait cru, que la variation diurne soit *nulle* dans *tous les points de l'équateur magnétique*. (*Connaissances des Temps*, 1828).

457. La comparaison des positions analogues de l'aiguille à différens jours, mais aux mêmes heures, a établi que, depuis l'équinoxe du printemps jusqu'au solstice d'été suivant, la pointe nord revient vers l'est, et qu'elle marche vers l'ouest le reste de l'année.

Cette variation annuelle, découverte par M. Cassini, en 1784, a été confirmée, en 1800, par M. Gilpins. D'une autre part, M. Arago, par la discussion des observations du docteur Bowditch, aux États-Unis, et de celles de M. Baufoy, à Londres, a reconnu que dans le premier pays la période est transportée (en 1811) à une autre époque de l'année, et que dans le second la variation annuelle ne s'est pas manifestée de 1817 à 1820. Ainsi, de nouvelles observations sont nécessaires sur ce sujet.

458. Beaucoup de physiciens ont considéré la variation de la température comme la cause de la variation diurne et de la variation annuelle; cette opinion se conçoit très bien, s'il est vrai, comme nous le dirons plus loin, que l'aiguille horizontale soit toujours perpendiculaire à la ligne isodyna-

(1) Pour rendre cette étendue beaucoup plus grande, on affaiblit la force directrice de l'aiguille, en plaçant celle-ci entre deux aimans. C'est ce qu'avait d'abord pensé M. Biot, et c'est ce qu'a constaté M. Barlow (*Ann. de chim. et de Phys.*, t. 23 p. 415). Voyez aussi un mémoire de M. Biot (même journ., t. 24).

mique, dont la position doit changer avec la température, en sorte que la terre ne serait qu'un vaste appareil thermo-électrique. Pour fixer les idées, au lever du soleil, tous les points à l'est du lieu s'échauffent, la ligne isodynamique se renfle en s'éloignant de l'équateur, la pointe nord de l'aiguille marche vers l'ouest dans l'hémisphère boréal, ce serait le contraire dans l'hémisphère austral; après le passage du soleil au méridien, l'aiguille doit éprouver un déplacement opposé. Des considérations analogues sont applicables à la variation annuelle.

459. La foudre qui tombe près d'une aiguille peut en affaiblir ou en renverser les pôles. On cite plus d'un exemple où des navigateurs, trompés par l'aiguille ainsi dérangée, se sont jetés sur des écueils.

L'aurore boréale cause aussi des variations brusques et accidentelles dans la position de l'aiguille (*voyez* Aurore boréale). Il n'est pas certain que les tremblemens de terre et les éruptions volcaniques exercent une influence.

460. La boussole ordinaire est représentée dans la *fig.* 277; c'est tout simplement une aiguille aimantée renfermée dans une boite, et libre de se mouvoir dans le plan horizontal.

Il faut autant que possible diminuer le frottement; c'est pourquoi, voulant rendre les aiguilles très légères, on borne l'épaisseur au degré nécessaire pour qu'elles ne se déforment point par la flexion. On forme aussi la chape avec un corps dur (agate), afin que le pivot ne la pénètre pas. Il résulte encore des expériences de Coulomb que les aiguilles en flèche ont, à poids égal, une force directrice plus considérable.

La trace de la résultante horizontale des forces magnétiques se trouve dans le méridien magnétique; pour la déterminer avec rigueur, on fait l'opération du retournement. On observe d'abord l'aiguille dans une position, on la retourne, et l'on fait une seconde observation. Le méridien magnétique est évidemment placé entre les deux directions de l'aiguille, lesquelles sont en général peu différentes. Sans cette double opération il resterait de l'incertitude, puisque l'axe magnétique d'une aiguille ne coïncide pas toujours avec l'axe de figure.

Quand il s'agit de déterminer de petits mouvemens de l'aiguille, comme ceux des variations diurnes ou annuelles, on doit l'observer par le moyen de lunettes fixes. L'aiguille de l'Observatoire de Paris consiste en une aiguille aimantée *A B* (*fig.* 264), suspendue par un fil de soie sans torsion. Le mouvement de l'aiguille, indiqué par un cercle *C D*, est observé à l'aide de lunettes *L* et *L'*. L'aiguille et le fil de suspension sont renfermés dans une boite, et soustraits ainsi aux agitations de l'air. Les boussoles qui sont adoptées à l'Observatoire de Paris sont de M. Gambey.

La boussole marine, ou compas de variation, est une boussole de déclinaison disposée de manière à être toujours horizontale malgré les agitations de la mer.

De l'Inclinaison.

461. Une aiguille d'acier suspendue par son centre de gravité, et non aimantée, reste dans une position horizontale. Dès qu'elle est aimantée, elle s'incline sensiblement. Dans notre hémisphère le pôle boréal s'abaisse au-dessous de l'horizon; c'est le contraire dans l'hémisphère austral. (On fait ici abstraction de l'inclinaison de l'équateur magnétique sur l'équateur terrestre.) *Voyez* plus loin.

Pour obtenir l'inclinaison avec toute la rigueur désirable, il faut faire plusieurs expériences.

1° On détermine l'inclinaison en présentant successivement chaque face de l'aiguille à l'orient et à l'occident magnétique. Cette opération est destinée à compenser le défaut de coïncidence de l'axe magnétique avec l'axe de figure.

2° Afin d'éviter les défauts de centrage, on change les pôles de l'aiguille, au moyen de forts aimans, et l'on recommence la première expérience; on prend la moyenne des quatre résultats.

3° Il est encore utile de prendre l'inclinaison en plaçant l'aiguille dans deux plans rectangulaires. On calcule i par la formule $\cot.^2 i' + \cot.^2 i'' = \cot.^2 i^2$ (*Voy.* la note p. 191).

Malheureusement peu d'observateurs ont rempli ces conditions.

462. L'inclinaison n'est pas constante dans le même lieu : en 1671, elle était à Paris de 75°; en 1798, de 69° 51'; en 1835, 67° 24'; à Londres, en 1775, elle était de 72° 30'; en 1805, de 70° 21.

A Berlin, en 1806, de 69° 53'; en 1825, de 68° 31'.

A Florence, en 1805, de 63° 57'; en 1825, de 62° 56'.

Depuis les plus anciennes observations jusqu'à nos jours, l'inclinaison a toujours diminué à Paris; elle ne s'est pas arrêtée quand l'aiguille de déclinaison a été stationnaire : c'est un point important qu'il faut noter. La diminution de l'inclinaison paraît être générale en Europe.

L'inclinaison, suivant quelques observations, éprouve une variation diurne et annuelle; il y a encore peu d'observations sur ce sujet.

L'inclinaison augmente avec la latitude : ainsi dans l'hémisphère boréal le capitaine Philipps a trouvé l'inclinaison de 82° 9' sous la latitude de 79° 44'. Le capitaine Parry a observé des inclinaisons peu différentes de 90°, et même, ayant dépassé les 100° de long. occid. sous la lat. 74° 45'; il a vu le pôle nord de la boussole se retourner et se diriger vers le sud, ce qui prouve qu'il avait dépassé le pôle boréal du globe. (*Ann. de Ch. et de Phys.*, t. 15.) On a observé sur la glace sous la latitude 75° 5' (nord) et sous la longitude 62° 42', une inclinaison de 84° 25'.

Le capitaine Rhoss a vu l'aiguille d'inclinaison se tenir verticale à la latitude n. 70° 5′ sous la longitude 96° 46′. C'est le point qu'il a considéré comme le pôle magnétique boréal.

463. L'aiguille d'inclinaison qui sert aujourd'hui aux observations de l'Observatoire de Paris est représentée dans la *fig.* 269. Deux loupes mobiles permettent d'apprécier l'angle d'inclinaison indiqué sur le cercle vertical *C D*. Nous regrettons de ne pouvoir donner ici la description des excellentes boussoles de M. Gambey, qui sont aujourd'hui dans les principaux observatoires de l'Europe.

Équateur magnétique.

464. L'équateur magnétique est la courbe formée par l'ensemble des points où l'inclinaison est nulle. Peu de points de cette courbe ont été déterminés par des observations immédiates. Pour suppléer à celles-ci, on cherche la loi suivant laquelle varie l'inclinaison à mesure qu'on s'éloigne des lieux où elle est nulle. Cette loi étant connue, elle sert à calculer ce dont il faut augmenter ou diminuer la latitude et la longitude de la station où l'on a mesuré la déclinaison et l'inclinaison magnétiques, pour avoir les coordonnées du point correspondant de l'équateur.

Wilke, de l'Académie de Stockholm, dressa, en 1768, une carte qui donnait à l'équateur magnétique la forme d'un grand cercle, incliné de 12° sur l'équateur terrestre. Cette position presque hypothétique fut long-temps adoptée, mais elle ne satisfaisait pas à toutes les observations, et notamment à celles de M. de Humboldt. C'est la discussion de ces dernières observations qui a conduit MM. Biot et de Humboldt à reconnaître l'inexactitude du cercle tracé par Wilke.

M. Morlet s'est beaucoup occupé de la position de l'équateur magnétique. Pour en déterminer les différens points par interpolation, il a admis que *la tangente de l'inclinaison est double de la tangente de la latitude magnétique*, c'est-à-dire, tang. i=2 tang. l, relation dans laquelle l la distance à l'équateur magnétique est l'inconnue. Cette relation déjà employée par plusieurs physiciens paraît exacte, quand i est au-dessous de 30 degrés.

En traçant l'équateur magnétique d'après les observations faites par M. le capitaine Dupérey dans la circonnavigation de *la Coquille* pendant les années 1822, 1823, 1824 et 1825, et celle du capitaine Sabine, à l'île Saint-Thomas, à l'Ascension et à Bahia, il fut conduit, pour concilier les observations de Lacaille avec celles de Baily, à soupçonner dans l'équateur magnétique un mouvement de translation.

M. Arago discuta cette hypothèse dans le rapport qu'il fit à l'Académie, en 1825, sur le voyage de M. Dupérey, et remarqua en comparant les observations de cet habile navigateur avec celles de 1780, que l'équateur avait dû éprouver un mouvement d'orient en occident. Enfin il admettait des changemens possibles dans la forme.

M. Morlet, dans un nouveau travail, trouve que l'équateur s'est en effet transporté d'orient en occident, et que cette ligne a dû éprouver des altérations réelles dans la forme, et ces altérations sont tellement bizarres que l'équateur a dû marcher dans certains endroits du sud au nord, dans d'autres du nord au sud.

L'équateur magnétique tel que vient de le tracer M. le capitaine Dupérey, d'après ses propres observations, d'après celles du capitaine Sabine et de M. Blosseville, etc., ne rencontre l'équateur qu'en deux points, lesquels sont presque diamétralement opposés, et situés l'un dans l'océan Atlantique à 3°, 20′ à l'orient du méridien de Paris, l'autre dans le grand océan, à peu près dans le plan du méridien de Paris. Il s'éloigne peu de l'équateur terrestre dans les lieux où il ne rencontre que quelques îles éparses; il parvient à son maximum d'éloignement, soit au nord, soit au sud, dans les grands continens qu'il traverse. La figure tracée par M. Dupérey montre encore que cette courbe présente entre sa partie boréale et sa partie australe une symétrie beaucoup plus parfaite qu'on ne l'avait d'abord supposée. (*Ann. de Ch. et de Ph.*, t. 45, p. 371.)

Le nombre des observations exactes n'est pas encore assez considérable pour que la position de l'équateur magnétique soit définitivement fixée. Cette position d'ailleurs doit éprouver des oscillations diurnes annuelles et peut-être séculaires.

465. M. Hansteen a été conduit par la combinaison de diverses observations de déclinaison; d'inclinaison et d'intensité, à admettre deux pôles magnétiques dans l'hémisphère boréal, l'un en Amérique, dans la baie d'Hudson, l'autre en Asie, dans le nord de la Sibérie. Ces pôles ont leurs analogues dans l'hémisphère austral (1); d'après la carte tracée par M. Dupérey, il n'y a qu'un pôle dans chaque hémisphère.

De l'Intensité de l'Action magnétique du globe.

466. On peut se proposer plusieurs questions relativement à l'intensité magnétique du globe. Cette intensité s'exerce-t-elle avec le même degré d'énergie, 1° sur le globe et à de grandes distances de sa surface; 2° sur tous les points du globe subit-elle comme la déclinaison des variations diurnes et annuelles? 3° par quel moyen peut-on

(1) Ce savant croit en outre, d'après les expériences, que dans nos climats un objet vertical a deux pôles magnétiques distincts; le pôle austral dans le haut, et le pôle boréal dans le bas.

s'assurer si cette intensité éprouve quelque variation à de grands intervalles de temps, par exemple, quels genres d'observations doit-on faire aujourd'hui et dans deux siècles pour déterminer si notre globe a ou n'a pas conservé la même intensité magnétique?

Pour déterminer l'intensité magnétique, il est à peu près indifférent d'observer l'aiguille de déclinaison ou celle d'inclinaison ; seulement pour passer des résultats de la première à ceux que fournirait la seconde, il faudra diviser le carré des oscillations de l'aiguille horizontale, par le cosinus de l'angle d'inclinaison, ce qui se voit par l'inspection de la *fig.* 270. *R* étant la résultante des forces magnétiques, et *i* l'angle d'inclinaison, on a *R* cos. *i* pour la composante horizontale. Le mode de suspension de l'aiguille d'inclinaison pouvant, à cause du frottement, occasioner des erreurs, on préfère en général observer l'aiguille horizontale.

1° L'action magnétique du globe s'étend à de grandes distances sans perdre sensiblement (1) de son énergie; c'est ce qui résulte de l'observation faite successivement par Saussure sur le Mont-Blanc, par M. Humboldt sur le Chimborazo, par M. de Rossel à la Nouvelle-Hollande, et par MM. Gay-Lussac et Biot dans leur ascension aérostatique.

2° Les recherches de M. de Humboldt, en 1800, ont dévoilé un fait très remarquable, qui consiste dans l'accroissement de l'intensité de l'action du globe en allant de l'*équateur aux pôles magnétiques*. En effet, l'aiguille d'inclinaison, qui, au départ de M. de Humboldt pour son voyage dans le Nouveau-Monde, faisait à Paris 245 oscillations en 10 minutes, n'en faisait plus que 229 à Cumana (lat. 10° 28′ bor.), 218 à San-Carlos-del-Rio-Negro (lat. 1° 54′ bor.), et 211 sous l'équateur magnétique sur le dos de la Cordillière des Andes du Pérou entre la lat. 6° 44′ aust. et la lat. 7° 8′ aust. (Ouvrage cité, p. 616.) Il n'est pas à craindre que cette différence soit une suite du changement de température subi par l'aiguille ; car, rapportée à Paris, cette aiguille a encore fait des oscillations aussi rapides qu'avant le départ : le rapport de l'intensité magnétique du globe, au Pérou et à Paris, sera le rapport des carrés des nombres d'oscillations dans le même temps, c'est-à-dire

211². 245² ou 44521 : 60025 ou 10 : 13,5.

L'importante découverte de l'accroissement de l'intensité magnétique, à mesure qu'on s'approche des pôles, a été confirmée par les observations ultérieures de MM. les capitaines Parry, Freycinet, Dupérey, Sabine, de MM. Hansteen, Ad. Erman.

Il paraît que l'intensité des forces magnétiques varie de l'équateur au pôle, à peu près dans le rapport de 1 à 2.

Les lignes isodynamiques (d'égale intensité) ne sont pas parallèles aux lignes d'égale inclinaison.

Par exemple : l'intensité magnétique était sensiblement la même à Madrid qu'à Carthagène des Indes, en 1800, tandis que l'inclinaison était de 77° 62′ dans le premier lieu et de 39° 35′ dans le second à la même époque (M. de Humboldt).

En Sibérie, la ligne isodynamique est presque perpendiculaire aux courbes d'égale inclinaison (M. Ad. Erman).

D'après le défaut de parallélisme dont il vient d'être question, et de ce que l'intensité du magnétisme n'est pas une fonction de l'inclinaison, il n'est pas étonnant que tous les points de l'équateur magnétique ne présentent pas la même intensité.

M. Saigey a remarqué que l'aiguille horizontale se tient perpendiculairement à la ligne isodynamique du lieu.

3° Plusieurs savans ont cherché à apprécier si l'intensité magnétique du globe subit dans le même lieu des variations pendant la durée d'un jour ou d'une année.

M. Hansteen a déjà fixé l'attention des physiciens sur la relation qui paraît exister entre les lignes isodynamiques et les lignes isothermes. D'après la carte de M. Dupérey, on voit que les sommets concaves ou convexes de ces deux espèces de lignes correspondent aux mêmes méridiens.

Le minimum d'intensité diurne a lieu entre dix et onze heures du matin, et le maximum entre quatre et cinq heures de l'après-midi.

L'intensité moyenne varie pendant l'année; celle des jours rapprochés du solstice d'hiver surpasse celle des jours semblablement placés relativement au solstice d'été. Les variations d'un mois à l'autre sont à leur maximum vers les solstices, et à leur minimum vers les équinoxes.

Des expériences postérieures de M. Kupffer s'accordent assez bien avec celle-ci : ce savant russe place le maximum d'intensité en hiver (février), et le minimum à la fin de l'été (septembre et octobre); il trouve de plus que les variations diurnes sont plus grandes en été qu'en hiver. (*Ann. de Chim. et de Phys.*, t. 35, p. 225.)

Enfin M. Hansteen parle d'un affaiblissement d'intensité observé pendant une aurore boréale. M. de Humboldt avait déjà fait à Berlin une remarque analogue; en outre il annonce que l'intensité magnétique est affaiblie pendant le passage de la lune par l'équateur.

Comme toutes ces observations ont été faites avec une aiguille horizontale, il serait possible que les variations indiquées tinssent à un changement dans la direction plutôt que dans l'intensité de la résultante magnétique. En effet, *R* étant cette résultante, *i* l'angle d'inclinaison, la composante horizontale sera $H = R \cos. i$. En sorte que *H* peut

(1) M. de Humboldt a cru reconnaître un affaiblissement dans l'action de la force magnétique à mesure que la hauteur augmente (*Relat. Hist.*, 3e vol., p. 623), ce qui s'accorde avec les conséquences qu'a tirées M. Hansteen de ses observations au Caucase, et de celles qu'a faites M. Gay-Lussac dans son ascension aérostatique.

changer quoique R soit constant ; il suffit que i éprouve une légère variation.

D'après M. Arago, la variation de l'inclinaison ne représenterait que la moitié de la variation de l'intensité du maximum au minimum (1).

4° Les moyens employés pour déterminer les variations diurnes ou annuelles de l'intensité magnétique ne sont nullement propres à faire connaître les variations séculaires, parce qu'on n'a pas la certitude de conserver à un aimant quelconque la même énergie pendant un long espace de temps. M. Arago et M. Poisson ont proposé chacun un moyen de lever cette difficulté.

M. Arago pense qu'on pourrait s'assurer de la manière suivante si un aimant a un degré de puissance déterminé. Ce moyen est fondé sur ce qu'une aiguille aimantée, placée dans le voisinage d'une plaque métallique tournante, est entraînée avec d'autant plus de force que son degré de magnétisme est plus intense. Pour faire cette expérience, il faut placer l'aiguille dans un plan perpendiculaire à l'aiguille d'inclinaison ; de cette manière on n'aura pas à craindre l'influence du globe ; le petit poids dont l'aiguille devra être munie pour se tenir dans une certaine position, par exemple à 20° de sa position naturelle, sous l'influence d'une plaque de cuivre d'une épaisseur et d'un diamètre donnés, animée d'une certaine vitesse et placée à une distance du plateau bien connue, permettra d'apprécier si l'aiguille s'est conservée ou ne s'est point conservée dans le même état magnétique. Si l'état magnétique n'a pas changé, l'aiguille pourra servir à la mesure de l'intensité du globe ; s'il a changé, il faudra remettre l'aiguille dans l'état primitif. Un morceau de fer ne pourrait pas être employé pour apprécier l'état magnétique d'une aiguille à de longs intervalles de temps, parce que ce métal ne peut pas être toujours obtenu identique, tandis que le cuivre pur est toujours identique.

M. Poisson propose de faire osciller deux aiguilles séparément sous l'influence du globe, ensuite chacune sous l'influence du globe et de l'autre aiguille, et à l'aide des résultats des oscillations il trouve par le calcul une quantité qui est liée à l'intensité absolue du globe. Cette quantité est indépendante de la puissance de chacune des aiguilles ; il faut seulement que cette puissance n'éprouve pas de variation pendant l'expérience. (Voyez *Ann. de Chim. et de Phys.*, t. 30, p. 259) (2).

(1) M. Kupffer remarque que, puisque l'intensité de la force magnétique à la surface de la terre varie dans le rapport de 1 à 2 seulement (M. Sabine), et cos. i de 1 à 0, l'inclinaison doit avoir plus d'influence sur le résultat que l'intensité.

(2) Dans tout ce qui précède, on a supposé l'aiguille placée dans le méridien magnétique. Il est intéressant de voir la décomposition que subit la résultante lorsqu'on place l'aiguille hors de ce plan.

Soit R la résultante $m\ R$ des forces magnétiques, comptée dans le méridien magnétique $z\,m\,n$ (*fig.* 271).

Moyen de corriger la déviation que la boussole éprouve par l'action des pièces de fer des vaisseaux.

466. La déviation de l'aiguille peut être causée, 1° par les décompositions que l'aiguille détermine elle-même dans les pièces de fer ; 2° par le magnétisme permanent de ces pièces, puisqu'elles sont oxidées en partie ; 3° par le magnétisme passager qu'elles reçoivent du globe.

En plaçant l'aiguille à une grande distance des pièces de fer, on se garantit de la première cause.

Supposons cette force appliquée en un point m d'une aiguille BA, mise d'abord dans une position horizontale, et pouvant se mouvoir autour d'un point C dans un plan vertical différent du méridien magnétique ; soient menées une verticale $m\,z$ et une horizontale $m\,n$, parallèles au méridien magnétique ; soit i l'angle de la verticale avec la résultante : on aura pour la composante horizontale et pour la verticale R sin. i et R cos. i. Celle-ci étant dans le plan de l'aiguille, il suffit de décomposer la composante horizontale $m\,n = R$ sin. i en deux autres, l'une $m\,k$ perpendiculaire à $m\,A$, et l'autre dans la direction $m\,A$. La première, égale à R sin. i sin. b (b est l'angle que fait le plan de l'aiguille avec le méridien magnétique), est détruite par la résistance de l'aiguille, puisque nous supposons cette dernière mobile seulement dans le plan $BCAz$; l'autre, égale à R sin. i cos. b, tendra, avec la composante verticale R cos. i, à donner une position fixe à l'aiguille. La résultante totale R' sera

$$R'^2 = R^2 \cos.^2 i + R^2 \sin.^2 i \cos.^2 b = R^2 \cos.^2 i\,(1 + \tang.^2 i \cos.^2 b),$$ d'où $R' = R \cos. i \sqrt{1 + \tang.^2 i \cos.^2 b}$. La direction $F\,G$ de la résultante R' sera donnée par la formule tang. i'

$$= \frac{R \sin. i \cos. b}{R \cos. i}, \text{ ou tang. } i' = \text{tang. } i \cos. b.$$

Cette formule peut être soumise à quelques épreuves. Supposons $b = o$, R' deviendra $R \cos. i \sqrt{1 + \tang.^2 i}$

$$= R \cos. i \frac{\sqrt{\sin.^2 i + \cos.^2 i}}{\cos. i} = R, \text{ et tang. } i' = \text{tang. } i.$$

Si $b = 100°$ on aura $R' = R$ cos. i. La résultante est alors égale à la composante verticale R cos. i ; elle en a aussi la direction, car pour $b = 100°$, tang. $i' = 0$. Pour vérifier ce résultat par l'expérience, qu'on détermine d'abord le méridien magnétique, puis qu'on place perpendiculairement à ce plan une aiguille d'inclinaison, on la verra prendre une direction verticale.

La formule tang. $i' =$ tang. i cos. b conduit à un résultat curieux. En effet, on aurait de même tang. $i'' =$ tang. i cos. $(b + 100)$,

d'où tang.^{2} i' + tang.^{2} $i'' =$ tang.^{2} i.

Cette équation fournit le moyen d'avoir l'inclinaison dans le méridien magnétique sans qu'on connaisse ce dernier ; il suffit de prendre l'inclinaison dans deux plans perpendiculaires. Ce procédé peut être utile pour vérifier des observations dans le méridien magnétique. Si l'on voulait appliquer cette formule à quelques observations, il faudrait faire attention que i représente ici le complément de ce qu'on prend ordinairement pour l'inclinaison. En sorte que la véritable formule est cot.^{2} i' + cot. $i'' =$ cot.^{2} i.

Quant à la seconde, l'aiguille étant placée à une distance très grande des divers pôles magnétiques du vaisseau, comparativement à la longueur, chacun de ces pôles agit sur elle comme un couple; le couple résultant de tous ces couples est constant dans tous les climats. Il se compose avec le couple terrestre, et produit un nouveau couple d'où résulte la déclinaison de l'aiguille. Pour avoir celle-ci, indépendamment de l'action du vaisseau, on la prend d'abord dans une position donnée du vaisseau, puis dans une position opposée; la moyenne entre les déclinaisons obtenues peut être considérée comme la vraie. En effet, le couple terrestre conserve la même direction dans l'espace; mais le couple du vaisseau, tournant avec le vaisseau, aura un maximum à droite et un maximum à gauche du méridien magnétique; en sorte que la déclinaison de l'aiguille produite par le vaisseau dans une position, sera détruite dans la position contraire. Il est plus difficile de tenir compte de la troisième cause, puisque les pôles magnétiques, déterminés passagèrement par le globe terrestre, varient à chaque position. Voici le moyen proposé par M. Barlow pour en neutraliser l'influence.

Le vaisseau étant dans une rade, on choisit sur le rivage un point d'où l'on puisse le voir dans toutes les positions : un observateur s'y établit avec une aiguille, cet observateur dirige une lunette vers un second observateur placé sur le vaisseau; ce second observateur dirige aussi une lunette vers le premier; chaque observateur mesure l'angle que la lunette fait avec son aiguille. M. Barlow appelle la direction des deux lunettes, *ligne centrale ;* l'aiguille du rivage, étant placée à une grande distance du vaisseau, n'éprouve aucune action sensible de la part de ce dernier, en sorte que l'angle des deux aiguilles peut être considéré comme la déviation. En faisant faire au vaisseau une révolution complète, et en répétant l'observation précédente de 10 en 10 degrés, on aura la valeur de la force déviatrice pour toutes les positions du vaisseau.

Après cette première opération, l'observateur du rivage substitue à son aiguile celle du vaisseau; seulement il la place sur un support en bois formé par quatre planches (*fig.* 279). Sur l'une de ces planches est fixé le *compensateur magnétique*, qui se compose d'une tige *A B* en cuivre rouge, d'un pouce et demi de diamètre, et de deux plaques circulaires en fer *C D*, de 12 1/2 pouces environ de diamètre, et d'une épaisseur telle, que le pied carré pèse 3 liv. Ces deux plaques sont séparées par une feuille de carton et serrées l'une contre l'autre par le moyen d'écrous.

On tourne cet appareil avec l'aiguille, de manière à faire éprouver à celle-ci toutes les déviations qu'elle éprouvait sur le vaisseau; puis on reporte sur le vaisseau l'aiguille avec le compensateur, et on la place, par rapport à celui-ci, comme elle était sur le rivage; de cette manière, la déviation de l'aiguille est double de celle que détermine le vaisseau seul, ce qui fournit le moyen de connaître cette dernière. Supposons donc que dans une observation faite sans le compensateur, l'aiguille ait marqué 28 degrés de déclinaison occidentale; et que, dans une observation faite avec le compensateur, on ait trouvé 34 degrés occident. Le compensateur seul augmente la déclinaison de 6 degrés; conséquemment le vaisseau l'augmente de la même quantité; ainsi la déclinaison réelle est de 22 degrés. Si le compensateur avait produit une diminution dans la déclinaison, il aurait fallu en ajouter la valeur à la déviation observée sans cet appareil; ce procédé ne fournit encore qu'une correction approximative, mais c'est un pas vers un procédé meilleur.

Nous remarquerons que la comparaison du compensateur avec le vaisseau devrait être répétée dans divers parages, pour que la correction pût être considérée comme à peu près exacte.

468. Il a été remarqué par plusieurs navigateurs que la marche des chronomètres n'est pas la même à bord et sur le rivage. La différence s'élève quelquefois jusqu'à 10 secondes par jour. Cet effet doit être produit par l'influence magnétique des pièces de fer des bâtimens, puisqu'il est prouvé que la proximité d'un aimant dérange la marche d'un chronomètre. Jusqu'à présent, on n'a pas trouvé de procédé propre à corriger cette aberration; on se borne à laisser les chronomètres dans la même position et le plus loin possible des pièces de fer.

469. Il serait superflu de rappeler ici les explications bizarres que les anciens donnaient des phénomènes de l'aimant. Le judicieux Gilbert en fit voir le vague, et s'abstint de donner une explication; Descartes y introduisit nécessairement ses tourbillons, qui disparurent devant l'examen sévère d'Œpinus. Celui-ci montra que les phénomènes magnétiques peuvent se déduire des lois de l'attraction et de la répulsion. Il n'admit qu'un seul fluide.

On admit ensuite deux fluides analogues aux deux fluides électriques, et pouvant traverser les corps.

Coulomb modifia cette opinion en supposant que les fluides boréal et austral n'éprouvent que des déplacemens infiniment petits, et ne sortent pas de la molécule à laquelle ils appartenaient avant l'aimantation. L'opinion de ce célèbre physicien est établie sur les deux faits suivans.

Si l'on présente un aimant à un amas d'aiguilles de fer ou d'acier non trempé, il en enlève un grand nombre qui s'attachent à la suite les unes des autres. Soustrait-on les aiguilles à l'influence de l'aimant, elles se remettent dans l'état naturel, et le barreau ne gagne ni ne perd rien.

Le second fait, c'est qu'un fragment d'un aimant naturel ou artificiel, quelque petit qu'il soit, possède les deux pôles boréal et austral, la section ne pouvant avoir lieu qu'entre deux particules.

M. Poisson a soumis récemment les principes de Coulomb à une analyse rigoureuse. L'accord qui

règne entre les résultats du calcul et ceux de l'expérience est une présomption favorable à l'hypothèse de Coulomb.

470. Le magnétisme présente des points de ressemblance et des points de dissemblance avec l'électricité.

La loi des attractions et des répulsions est la même pour le magnétisme et pour l'électricité.

Nous avons vu, en faisant l'histoire de l'électricité; qu'il y a des corps conducteurs et des corps non conducteurs; que les premiers s'électrisent facilement par influence, et qu'ils perdent leur état électrique aussitôt qu'ils sont éloignés de la source d'électricité. Au contraire, les seconds s'électrisent difficilement par influence; mais, dès qu'ils sont électrisés, ils restent long-temps dans leur état. On trouve une division analogue dans les corps susceptibles d'aimantation.

Une différence entre le magnétisme et l'électricité, c'est qu'un corps électrisé est dépouillé de son électricité par le contact d'un corps conducteur; tandis qu'un aimant naturel ou artificiel ne cède rien aux corps qu'il touche.

De l'action réciproque des Aimans et des différens Corps.

471. Nous avons dit, en commençant l'étude du magnétisme, que les seuls métaux magnétiques jusqu'à présent connus sont le fer, le nickel, le cobalt et le manganèse. Ce sont en effet les seuls auxquels on ait pu imprimer un état magnétique énergique et durable; cependant il résulte des recherches de Coulomb (1812), que des aiguilles fines et légères de toutes les substances, suspendues à des fils de soie, entre les pôles de deux aimans puissans, se dirigent toujours dans le sens de ces pôles. De plus, si l'on compte le nombre d'oscillations que ces différentes aiguilles font quand on les dérange de leur position d'équilibre, on trouve qu'elles oscillent plus rapidement en présence des aimans, que lorsqu'elles sont isolées dans l'espace.

Coulomb, en comparant ces effets à ceux que produisent des alliages contenant de très petites quantités de fer, a été conduit à cette conséquence : que si le fer ou toute autre substance magnétique est la vraie cause de ces phénomènes, la quantité doit en être trop petite pour être appréciable à l'analyse chimique.

M. Lebaillif a récemment constaté que presque tous les corps exercent une action à distance sur l'aiguille aimantée.

L'or et l'argent purs, le cuivre rosette, le palladium, l'étain, le plomb révifié du sulfate, le zinc, sont sans action; enfin le bismuth et l'antimoine *exercent une action répulsive*. Ce dernier fait est tout-à-fait *nouveau et inexpliqué;* à moins qu'on admette qu'il se développe dans ces deux métaux des courans contraires (voyez plus loin *Courans par influence*); mais pourquoi ne s'en développe-t-il pas dans les autres métaux?

Lebaillif a donné à son appareil le nom de *sidéroscope*. Cet appareil se compose d'un brin de paille de dix pouces environ de longueur, dans lequel une aiguille *c d* est simplement glissée. Le tuyau de paille est suspendu à un fil de cocon dédoublé (*fig.* 261 *bis*). Le tout est renfermé dans une cage en verre. On présente le corps à essayer à l'extrémité australe de l'aiguille.

Cet instrument jouit d'une grande sensibilité; il peut servir avec avantage dans tous les cas où l'on veut reconnaître des traces de fer. Aussi est-il déjà employé à l'Administration des Monnaies, dans quelques raffineries de cuivre, etc. (Voyez *Bulletin des Sciences*, tome 8, page 87.)

M. Saigey (*Bulletin des Sciences*, tom. 8, p. 287) a annoncé 1° que tous les corps exercent entre eux une action répulsive très faible. Cette répulsion n'est pas due au magnétisme. Le fait cité plus haut, relatif au bismuth et à l'antimoine, est un cas particulier du fait général.

2° Deux corps, portés à des températures différentes, exercent une attraction l'un sur l'autre.

M. Fresnel avait déjà reconnu l'action répulsive réciproque des corps échauffés.

Du Magnétisme en mouvement.

472. C'est à M. Arago que la science doit la découverte de cette force magnétique.

Les faits découverts par M. Arago sont des deux espèces : les premiers ont pour objet l'influence *des corps en repos* sur l'aiguille aimantée en mouvement; les seconds, l'influence *des corps en mouvement* sur l'aiguille en repos.

1° Une aiguille aimantée suspendue à un fil vertical, et écartée de 53° du méridien magnétique, y revient par une suite d'oscillations de plus en plus petites. Si l'on note le nombre des oscillations nécessaires pour que la déviation soit réduite à 43°, on voit ce nombre varier avec la nature de la substance au-dessus de laquelle oscille l'aiguille.

Les résultats fournis par les métaux, et surtout par le cuivre, sont très marqués. Un plateau de ce dernier métal réduit à quatre le nombre des oscillations appréciables d'une aiguille qui, dans l'air, et hors de l'influence du cuivre, en fait plus de 400 appréciables.

Il est bien démontré par ces expériences qu'une aiguille aimantée éprouve de la part de tous les corps, et surtout des métaux, une influence qui *diminue* rapidement *l'amplitude des oscillations* sans en altérer la durée.

2° M. Arago, guidé par ce principe de méca-

nique, savoir, que la réaction est égale à l'action, est parvenu à entraîner une aiguille en repos par une plaque en mouvement.

L'appareil employé dans ces nouvelles expériences se compose de deux parties isolées l'une de l'autre. La première est une horloge dont tous les rouages sont en cuivre; elle imprime à la plaque un mouvement de rotation régularisé par un volant, et dont on mesure la vitesse à l'aide d'une aiguille qui indique le nombre des révolutions accomplies dans un temps déterminé. La seconde partie consiste en un cylindre en verre, fermé, à sa partie inférieure, par une feuille de papier, et à sa partie supérieure par une plaque de verre, au centre de laquelle est fixée une tige en cuivre qui s'abaisse ou s'élève à volonté, et qui porte le fil auquel est suspendue l'aiguille aimantée. Une alidade indique la direction de l'aiguille, dont on fait coïncider le centre avec celui de la plaque tournante.

Une vitesse de rotation assez petite, imprimée à une plaque métallique, fait dévier l'aiguille d'une manière notable. Si ce mouvement est lent et uniforme, l'aiguille se fixe dans une position déterminée; si le mouvement est assez rapide pour produire une déviation de plus d'un angle droit, l'aiguille est entraînée, et décrit une circonférence entière, et continue son mouvement avec une vitesse qui va en augmentant jusqu'à ce que la plaque cesse de tourner. Pour donner une idée de l'intensité de la force dont il s'agit, nous citerons un résultat.

Une plaque de cuivre, épaisse d'environ une ligne, et se mouvant avec une vitesse de 4 à 5 tours par seconde, imprime, à la distance de plus d'un pouce, un mouvement de rotation à un barreau aimanté dont la longueur est un peu moindre que celle du diamètre du disque tournant.

M. Arago, voulant avoir une donnée sur le pouvoir magnétique du cuivre hors de l'état de mouvement, a soumis une aiguille à l'action d'un barreau de ce métal, et a observé, à 1/10 de millimètre de distance, un déplacement angulaire de 2′ environ.

Tous les métaux peuvent donner naissance aux phénomènes précédens, mais à un degré beaucoup moindre que le cuivre. Si le plateau est remplacé par le métal réduit en poudre ou en copeaux, l'aiguille est à peine déviée.

La nouvelle force dont nous nous occupons diminue avec la distance; on conclut des phénomènes de rotation, qu'elle agit perpendiculairement aux rayons du disque, et parallèlement à sa surface.

L'expérience suivante montre qu'il existe aussi une force répulsive perpendiculaire à la surface du disque. On suspend verticalement une aiguille aimantée par une de ses extrémités à l'un des plateaux d'une balance, et l'on établit l'équilibre : si ensuite l'on fait tourner un disque en cuivre au-dessous de l'aiguille, elle est repoussée, puisque la balance penche de l'autre côté.

M. Arago a encore constaté qu'il existe une force agissant dans le sens des rayons, et parallèlement à la surface du plateau. En effet, si l'on rend verticale une aiguille d'inclinaison, et qu'on en fasse passer le plan de rotation par le centre du plateau, en portant la pointe de l'aiguille au-dessus des différens points d'un même rayon ou de son prolongement, on voit qu'elle est repoussée quand elle tombe hors du plateau; cette force répulsive diminue à mesure qu'on approche du centre, puis elle devient nulle, en un point plus voisin du bord que du centre, ensuite elle se change en une force attractive; enfin elle redevient nulle au centre.

Ainsi l'action d'un plateau métallique, circulaire, horizontal, et tournant sur son centre, peut être décomposée en trois forces, l'une perpendiculaire au plateau; l'autre horizontale et perpendiculaire au plan vertical qui contient le rayon aboutissant à la projection du pôle de l'aiguille; et la troisième dirigée parallèlement au même rayon.

M. Arago a cherché le rapport de ces trois forces, et il a reconnu qu'il varie avec la vitesse de rotation du plateau.

L'importance des nouveaux faits dont M. Arago vient d'enrichir la science est d'autant plus grande que le lien qui les rattache aux faits anciens est moins connu. (*Ann. de Chim. et de Phys.*, t. 32, p. 213. — *Société Phyl.*, 1825.)

Si l'on pratique, à une petite distance du centre, des fentes étroites dans le disque, il produit à peine une déviation de quelques degrés.

Les expériences curieuses de M. Arago ont été répétées et confirmées par les physiciens étrangers. MM. Herschell et Babage ont remarqué de plus qu'en ressoudant les bords des fentes pratiquées dans une plaque, par un métal dont l'influence magnétique est très inférieure, on rend à la plaque sensiblement toute son énergie; mais qu'en remplissant ces fentes avec du métal en poudre ou avec un liquide, on ne répare pas sensiblement la perte d'intensité occasionée par les solutions de continuité.

Les mêmes physiciens ont représenté par les nombres suivans le pouvoir de plusieurs métaux : cuivre 1; zinc 0,93; étain 0,46; plomb 0,25; antimoine 0,09; bismuth 0,02. Ils ont de plus constaté, 1° qu'un écran d'une substance non comprise parmi les quatre métaux cités au commencement de l'histoire du magnétisme, n'exerce aucune influence lorsqu'on le place entre l'aimant et le plateau tournant; 2° qu'un plateau tournant n'entraîne pas un autre plateau dans l'état de repos.

M. Barlow a aussi observé que le mouvement augmente la puissance magnétique du fer.

M. Ampère a mis en mouvement par l'action d'un disque tournant un conducteur voltaïque, disposé en spirale à chacune de ses extrémités.

La théorie de l'influence des plaques tournantes n'est pas encore complètement faite. On a supposé que chaque pôle de l'aiguille donne naissance à un pôle de nom contraire qui se déplace dans la surface de la plaque, et qui disparaît moins vite qu'il ne

s'est formé. Mais les conséquences de cette hypothèse ne sont pas d'accord avec les faits, et particulièrement avec l'expérience de la balance. Outre les mémoires de M. Arago cités ci-avant, *voyez* un mémoire de M. Poisson (*Ann. de Chim. et de Phys.*, t. 32, p. 225), dans lequel ce célèbre géomètre propose une théorie du magnétisme en mouvement. M. Faraday a fait de nouvelles expériences sur ce sujet. D'après ce savant, il se produit, dans les plateaux en cuivre, des courans d'induction qui exercent sur les galvanomètres une action notable. (Voyez plus loin.)

PHÉNOMÈNES ÉLECTRO-DYNAMIQUES.

473. M. Œrsted, de l'Académie de Copenhague, a découvert, en 1819, un phénomène tout-à-fait remarquable, celui de l'action du courant voltaïque sur l'aiguille aimantée. Cette découverte a donné lieu à un grand nombre de belles recherches en France et dans le reste de l'Europe.

Nous exposerons les principaux faits connus aujourd'hui sur cette nouvelle branche de la physique.

Voici en quoi consiste la découverte de M. Œrsted.

Lorsqu'on approche d'une aiguille aimantée une portion quelconque du fil conducteur qui réunit les deux extrémités d'une pile en action, on voit cette aiguille se *détourner de sa direction primitive*; c'est bien le courant qui détermine la déviation, puisque, si on l'interrompt, l'aiguille reprend aussitôt sa position (1).

Si l'énergie de la pile s'affaiblit, la déviation diminue.

L'électromètre ordinaire indique l'existence de l'intensité de la tension électrique. Il manquait un instrument qui fît connaître la présence *du courant électrique* dans un conducteur ou dans une pile, et qui en indiquât la direction et l'énergie : on le possède aujourd'hui dans la boussole.

Lorsque les faits découverts par M. Œrsted furent connus en France, M. Ampère les analysa, et montra qu'ils se réduisaient aux deux suivans :

474. Premier fait. *Action directrice.* Supposons qu'une pile soit placée horizontalement, à peu près dans la direction du méridien magnétique, et qu'on ait disposé dans la même direction une portion du fil conducteur; supposons que plus d'une aiguille aimantée soit mise au-dessous et au-dessus d'une portion de ce conducteur, elle sera déviée dans un sens qu'on pourra connaître d'après la règle suivante. Si l'on se place par la pensée dans la direction du courant de manière qu'il soit dirigé des pieds à la tête, et qu'on ait la face tournée vers l'aiguille, c'est toujours à gauche que le pôle austral est porté par l'action du courant électrique.

Le même instrument peut servir à constater que le courant existe dans la pile, et qu'il se produit de l'extrémité négative à l'extrémité positive, c'est-à-dire en sens inverse de celui du conducteur. Ce qui doit être, puisque le fil forme avec la pile un circuit fermé.

Le courant électrique tend à mettre l'aiguille dans un sens perpendiculaire à sa propre direction; mais l'action du globe empêche qu'on obtienne ce résultat, en sorte que l'aiguille s'arrête dans une position oblique au fil. Si l'on détruit l'influence du globe, ainsi que l'a fait M. Ampère, en fixant l'aiguille aimantée perpendiculairement à un axe auquel on donne la direction de l'aiguille d'inclinaison, l'aiguille se place de manière à faire un angle droit avec le courant (1).

M. Ampère a été conduit à la construction de cet instrument par cette considération, que, quand une aiguille aimantée ne peut se mouvoir que dans un plan en tournant autour d'un axe perpendiculaire à ce plan, elle est toujours amenée, par l'action du globe, dans la situation où elle forme le plus petit angle possible avec la direction de l'aiguille d'inclinaison qu'elle prendrait si elle était libre, de manière que son pôle austral soit le plus près possible du pôle austral de l'aiguille d'inclinaison. Il suit de là que quand on veut la direction de l'aiguille dans un plan quelconque, il faut projeter la direction de l'aiguille d'inclinaison sur le plan. La ligne de projection sera celle où s'arrêtera l'aiguille. Or, il est évident que si le plan est perpendiculaire à la direction de l'aiguille d'inclinaison, celle de l'aiguille aimantée formant toujours un angle droit avec elle, et ne pouvant ni s'en approcher ni s'en éloigner, toutes les positions lui deviennent indifférentes. L'appareil dont il s'agit ici est représenté dans la *fig.* 285 *ter*. L'aiguille aimantée se meut dans le plan d'un cer-

(1) L'électricité ordinaire, celle qui est soutirée des nuages par un paratonnerre, dévie aussi l'aiguille aimantée. (M. Colladon.)

(1) Il existe en général trois moyens de rendre une aiguille aimantée astatique. Le premier est celui que nous venons de décrire; le second, employé par M. Biot, consiste dans un fort aimant dont on place les deux pôles dans le méridien magnétique, de manière que le pôle austral soit au Nord, et le pôle boréal au Midi, et qu'on éloigne ou rapproche de l'aiguille qu'on veut rendre astatique, jusqu'à ce que son action, qui est toujours opposée à celle que la terre exerce sur la même aiguille, lui devienne égale, et on reconnaît qu'on y est parvenu quand l'aiguille n'affecte plus une position déterminée; le troisième, qui a été imaginé par M. Ampère, est représenté dans la *fig.* 294. On attache à un fil de cuivre vertical *A B C*, mobile sur la pointe *C*, deux aiguilles d'acier semblables, dont le magnétisme est de même intensité, et dont les pôles sont en sens contraire, en sorte que la terre, agissant avec des forces égales et opposées sur les deux aiguilles dans toutes les positions qu'elles peuvent prendre, est sans action sur l'ensemble des deux aiguilles.

cle divisé. On donne à ce cercle, et conséquemment à l'aiguille, toutes les positions désirées à l'aide de deux charnières *a* et *a'*. Les bâtons de verre *c* et *c'* soutiennent le fil conducteur de la pile.

475. Second fait. *Action répulsive ou attractive.* Ce second fait consiste en ce qu'un fil conducteur et un aimant dont l'axe fait un *angle droit* avec la direction de ce fil, *s'attirent* quand le pôle austral est à la gauche du courant qui agit sur lui, c'est-à-dire quand la position est celle que le fil conducteur et l'aimant tendent à prendre en vertu de leur action mutuelle. Bien entendu, comme l'a remarqué M. Ampère, qu'il faut, pour que cette attraction ait lieu, que la droite qui mesure la plus courte distance entre le fil et l'axe de l'aimant rencontre cet axe entre les pôles; cette observation est d'autant plus importante qu'elle explique pourquoi l'action attractive devient nulle vis-à-vis du pôle et se change en répulsion quand la droite qui mesure la plus courte distance entre le fil conducteur et l'axe rencontre cet axe au delà du pôle; il y a au contraire répulsion quand le pôle austral est à droite, c'est-à-dire quand le fil conducteur et l'aimant sont maintenus dans une position opposée à celle qu'ils tendent à se donner; pourvu toujours que la ligne qui mesure la plus courte distance tombe entre les deux pôles; car, lorsqu'elle tombe au delà, il y a attraction; l'action entre le fil conducteur et l'aimant est toujours réciproque dans tous les cas dont nous venons de parler, comme on peut s'en assurer en approchant un aimant d'un conducteur mobile.

476. Nous allons exposer le plus méthodiquement qu'il nous sera possible les faits connus aujourd'hui sur les attractions et les répulsions des fils conducteurs; mais nous observerons d'abord que ces attractions et ces répulsions diffèrent essentiellement de celles que l'électricité produit dans l'état de repos.

Dans les attractions et les répulsions électriques ordinaires, ce sont les électricités d'espèce opposée qui s'attirent, et celles de même nature qui se repoussent. C'est le contraire pour les courans électriques; l'attraction a lieu entre ceux qui vont dans le même sens et la répulsion entre les courans qui vont en sens opposé. De plus, si deux fils conducteurs sont attirés, ils restent attachés tant que dure le courant électrique, tandis que dans l'électricité ordinaire la répulsion succède plus ou moins promptement à l'attraction; on peut encore ajouter que les effets des courans électriques ont lieu dans le vide comme dans l'air, au lieu que l'électricité ordinaire se dissipe dans le vide.

Attraction et répulsion des courans électriques.

477 1° M. Ampère, bientôt après la découverte de M. Œrstedt, démontra que deux courans électriques s'attirent quand ils se dirigent parallèlement dans le même sens, et qu'ils se repoussent quand leurs directions parallèles sont opposées. Il s'assura ensuite que la même chose a lieu, quel que soit l'angle des deux fils, aigu, droit ou obtus; en sorte qu'il y a toujours attraction quand les courans des deux fils vont tous les deux en s'éloignant ou en s'approchant du sommet de l'angle qu'ils forment (*fig.* 285), et répulsion dans le cas où l'un va en s'en approchant, et l'autre en s'en éloignant (*fig.* 286).

Au reste, pour donner à la loi que nous venons d'énoncer toute la généralité dont elle est susceptible, il faut remarquer que, dans le cas où les deux fils conducteurs ne sont pas dans le même plan, on doit considérer comme le sommet de l'angle la ligne qui mesure la plus courte distance des deux fils.

Si les deux fils conducteurs sont parallèles entre eux, il faut les regarder comme formant un angle infiniment petit, dont le sommet est à une distance infinie. La répulsion dans ces expériences est égale à l'attraction, ce qu'on peut vérifier par l'expérience suivante :

(*Fig.* 287.) Un fil conducteur replié sur lui-même, de manière que ces deux portions *AB* et *BC* ne soient séparées que par la soie dont on les recouvre, n'exerce plus aucune action sur un autre fil quelconque *DE*.

L'action d'un courant rectiligne est la même que celle d'un courant sinueux qui s'écarte très peu de la ligne droite. On le démontre en remplaçant dans l'expérience précédente le fil rectiligne *BC* par un fil sinueux (*fig.* 293).

2° On doit considérer deux portions contiguës d'un même courant rectiligne comme deux courans qui forment un angle de 180°, dont le sommet est au point qui les sépare; on voit alors que, le courant d'une des portions allant vers le sommet et l'autre s'en éloignant, il doit y avoir répulsion, comme M. Ampère l'a constaté par l'expérience suivante. Sur un plat *A B C D* (*fig.* 278), séparé, par la cloison isolante *A C*, en deux compartimens égaux et remplis chacun de mercure, on place un fil de cuivre recouvert de soie, dont les branches *q r*, *p n* peuvent flotter sur le mercure parallèlement à la cloison, les extrémités nues *r s*, *n m* touchant la surface du bain. En faisant plonger dans la capsule *E* l'extrémité du fil positif, et dans la capsule *F* celle du fil négatif ou réciproquement, on établit deux courans indépendans l'un de l'autre, dont chacun a pour conducteur une partie de mercure et une partie solide : quelle que soit la direction du courant, on voit toujours les deux fils *r q* et *p n* marcher parallèlement à la cloison *A C*, du côté opposé à celui où l'appareil est en communication avec la pile, ce qui indique une répulsion pour chaque fil, entre la portion de courant établi dans le mercure et son prolongement dans le fil lui-même. Suivant le sens du courant, le mouvement du fil de cuivre est plus ou moins facile, parce que, dans un cas, l'action du globe, sur la portion horizontale *q p*, concourt avec la répulsion dont il est

question, et que dans l'autre, au contraire, elle la combat. (*Voyez* plus loin Action de la terre.)

3° Si un courant rectiligne et indéfini dans les deux sens agit sur un courant mobile, perpendiculaire, et qui ait une de ses extrémités près du premier, celui-ci le portera parallèlement à sa direction; le mouvement aura lieu dans le *sens du courant indéfini lorsque le courant mobile va en s'en éloignant*, et *dans le sens opposé lorsqu'il va en s'en approchant;* il suffit, pour s'en convaincre, de jeter les yeux sur les deux *fig.* 288 et 292.

En effet, si l'on prend sur le courant *m n* à égale distance du point *o*, où il est le plus près du courant mobile, deux distances égales *o m* et *o n*, et que d'un point quelconque *c* du courant mobile on mène deux obliques *c m* et *c n*, elles seront égales et formeront des angles égaux avec les directions des deux courans; d'où il suit que les deux petites portions du courant indéfini situées aux points *m* et *n*, agissent avec la même intensité sur une petite portion située en *c*. Mais des deux forces égales *c p* et *c q* qu'exercent ces deux petites portions, l'une est attractive et l'autre répulsive, d'où il suit qu'en formant un parallélogramme sur leur direction, ce parallélogramme est un losange, dont la diagonale *c R*, qui est la résultante des deux actions, est évidemment parallèle à *m n*. Les résultantes des actions exercées sur les autres points du courant mobile *a c*, étant aussi parallèles à *m n*, il en sera de même de la résultante totale. Or, d'après ce que nous avons dit tout à l'heure sur l'action mutuelle des deux courans, on voit que dans la *fig.* 288 c'est l'action entre *m* et *c* qui est répulsive, et celle qui existe entre *n* et *c* qui est attractive; d'où il suit qui le courant mobile *a c* est porté dans le sens *c R*, qui est celui du courant indéfini *m n*. C'est le contraire dans la *fig.* 292.

L'action de ces deux courans est nécessairement réciproque, en sorte que si c'est le conducteur *m n* qui est mobile, et s'il ne peut que glisser le long de la droite *m n*, il reculera de *n* vers *m* dans la *fig.* 288, et se portera au contraire de *m* vers *n* dans la *fig.* 292. Il serait difficile de le vérifier avec un courant rectiligne, mais on y parvient aisément en le remplaçant par un courant circulaire auquel s'appliquent les mêmes considérations.

Cette expérience est de M. Savary. Voici la disposition de l'appareil à l'aide duquel on la réalise : Un cercle de cuivre (*fig.* 291), interrompu en *A* au moyen d'une petite pièce d'ivoire *C A*, plonge dans de l'eau acidulée contenue dans un vase métallique, communiquant avec une des deux extrémités de la pile. L'autre extrémité communique avec une petite coupe pleine de mercure, où vient aboutir la pointe *p* sur laquelle repose le cercle, et qui est réunie à ce cercle par le rayon *O C*; un autre rayon *O E* soutient aussi le cercle; mais il est de matière isolante.

On voit l'appareil tourner constamment dans le sens *A E C*, quelle que soit la direction du courant qui le traverse. Supposons d'abord que le courant arrive par le centre, il se rendra par le rayon *O C* au point *C*, suivra le cercle de cuivre *C E A*, traversera l'eau acidulée par les lignes *l m n*, *l' m' n'*, etc., perpendiculaires au cercle, et ira se rendre dans le vase métallique. Le courant ne passe pas immédiatement en totalité dans l'eau acidulée, à cause de l'obstacle qui existe au contact de deux corps, et à cause de la faiblesse de la propriété conductrice du liquide comparativement à la propriété conductrice du métal. Prenons un point *l* sur le cercle. Dans l'angle *m l k* il y a répulsion entre l'eau et le cercle; dans l'angle *m l k* il y a attraction : l'attraction et la répulsion concourent ici à donner au cercle un mouvement dans le sens *k h* ou *A E C*, et à l'eau un mouvement dans le sens opposé; ce dernier mouvement est insensible à cause de la masse liquide qui est considérable. Si au contraire le pôle positif communique avec le vase externe, alors le courant électrique arrivera perpendiculairement au cercle suivant les directions *l n m*, *l' n' m'*, etc., et se dirigera dans le sens *A E C O* pour se rendre à la coupe *O*. La répulsion ayant toujours lieu dans le sens *m h*, *m' h'*, le cercle tournera dans le même sens. Il est utile de remarquer que dans le premier cas *A E C* est opposé au courant dans le conducteur mobile, et dans le sens de ce courant, dans le second cas. On ne peut changer le sens de la rotation qu'en substituant à ce cercle un autre cercle représenté par la *fig.* 295, dans lequel la partie isolante *A C* est déplacée par rapport au conducteur *O C*.

4° Si le courant mobile traversait le courant indéfini en s'étendant également des deux côtés, la direction du courant mobile irait en s'en approchant dans une moitié *B A* et en s'éloignant dans la moitié *A C* (*fig.* 289); la première se porterait dans le sens *B E*, opposé à celui du courant indéfini, et l'autre moitié *A C* dans le sens *C F*, qui est celui du courant indéfini; on aurait donc un couple composé de deux forces *B E* et *C F*, qui ne produirait plus de mouvement de translation, mais ferait tourner le courant mobile *B C* autour du point *A*, *jusqu'à ce qu'il fût parrallèle à* M N *et dirigé dans le même sens*. Il est bon de remarquer que dans cette expérience, comme dans toutes celles où le conducteur mobile ne vient pas frapper contre le conducteur fixe, il passe, en vertu de la vitesse acquise, au delà de la position d'équilibre et y est ramené par une suite d'oscillations.

5° Supposons maintenant un courant indéfini *M N* (*fig.* 290) et un courant *B A* dans un fil conducteur mobile autour d'une de ses extrémités *A*, en sorte qu'il puisse décrire autour du point *A* une circonférence; lorsque le courant ira de la circonférence au centre, c'est-à-dire dans le sens *B A*, et qu'il se trouvera dans la situation marquée *B A* dans la figure, il ira en s'éloignant de *M N* et sera conséquemment porté dans le sens du courant *M N*, qui l'amènera dans la position *B' A* : il sera

alors parallèle à $M N$ et dirigé en sens contraire ; il sera donc repoussé et prendra la position $B'' A$: comme alors il ira en s'approchant du courant $M N$ il sera porté en sens contraire de ce dernier, et arrivera en $B''' A$; se trouvant maintenant parallèle à $M N$ et dirigé dans le même sens, il sera attiré, et sera porté en $B A$, d'où le même mouvement de rotation continuera indéfiniment.

Tant que le courant $M N$ est assez près du point A, l'action exercée par ce courant mobile sur le fil va en diminuant depuis la position $B A$ jusqu'à la position $B'' A$, parce que la distance entre les deux fils va en augmentant ; mais si le courant $M N$ était fort loin de A, la différence de distance deviendrait insensible, et alors le calcul montre que l'action $M N$ pour faire tourner $A B$ autour de A est la même dans toutes les positions que prend successivement le conducteur mobile. On rend l'action uniforme, même pour une petite distance, en pliant le conducteur fixe de manière qu'il forme un cercle autour de A, car il est clair qu'alors son action pour faire tourner $A B$ autour du point A devient constante.

Pour faire cette expérience, on se sert d'un vase de métal $D E F$ (*fig.* 285 *bis*), qui a environ 18 lignes de profondeur et dont le fond est percé à son centre d'une ouverture $d e f$, garnie d'un rebord intérieur dont la hauteur doit être égale à la profondeur du vase ; ce vase est rempli comme le précédent d'un mélange d'eau et d'acide, très étendu. On met dans cette ouverture un bouchon de liége, que traverse à frottement un gros fil de cuivre $P H$, destiné à élever ou à abaisser la coupe H dans laquelle plonge la pointe s du conducteur mobile $s k p$, terminé en p par une couronne de cuivre $p l$ soutenue de l'autre côté par une verge de matière isolante $l k$; le fil $P H$ communique en P avec une des extrémités de la pile, par exemple avec l'extrémité positive. On soude au vase $D E F$, un autre fil $M R T U N$, auquel on fait faire plusieurs tours pour que l'action de ce fil soit plus énergique ; il revient ensuite en U auprès du premier et va rejoindre l'autre extrémité de la pile ; dès que les communications sont établies, le courant monte par le fil $P H$, descend par le conducteur mobile, traverse le liquide, parcourt ensuite le fil $M R T U N$, et fait tourner dans le sens $v x$ et d'un mouvement continu le rayon $k p$ du conducteur mobile. Si les deux branches $l p$ et $k p$ étaient conductrices, la vitesse de rotation serait doublée.

Les courans qui traversent le liquide n'ont aucune influence sur la rotation ; en effet, si la branche $k p$ est seule conductrice, le courant de $p x l$ sera en sens contraire de celui de $p y l$. Si les branches $k l$ et $k p$ sont conductrices, il y aura dans chacun des demi-cercles deux courans opposés. Ainsi les actions déterminées par les courans du liquide se détruiront.

Si l'on élève la coupe H, et qu'on remplace le conducteur mobile par celui qui est représenté *fig.* 340 *bis*, le même mouvement de rotation continu aura également lieu, et l'expérience prouve que ce sera précisément avec la même force ; mais que si l'on place dans la coupe H la pointe s (*fig.* 282 *ter*) du conducteur $s p k i k$, dont l'autre extrémité k revient dans l'axe de rotation, et porte une coupe o, contenant du mercure qui doit la mettre en communication avec l'extrémité négative de la pile, ce nouveau conducteur, dont les deux extrémités sont dans l'axe de rotation, ne tournera plus par l'action du fil $M R T U N$.

Le sens dans lequel le conducteur mobile dont nous venons de parler tourne autour du point A, change lorsque l'on renverse la direction de l'un des courans.

Courans fermés et Solénoïdes.

478. La pile et le conducteur de cet instrument qui établit la communication entre les extrémités forment nécessairement un courant fermé, ou plutôt un assemblage de courans fermés qui sont seulement plus éloignés les uns des autres dans la pile que dans le fil. Lorsqu'on rend mobile une partie de ces assemblages de courans, si les deux points de jonction de la partie mobile et du reste du circuit sont très rapprochés l'un de l'autre, cette partie mobile est ce qu'on appelle un *courant fermé*, quoique le courant qui la parcourt ne le soit pas rigoureusement, puisqu'il faut toujours qu'il y ait une petite distance entre ses deux extrémités.

Pour avoir une idée juste du mouvement que cette partie doit prendre par l'action d'un conducteur fixe, il faut considérer celle que ce conducteur exerce sur chacune des parties dont le courant fermé se compose ; ce qui ne peut faire aucune difficulté d'après ce qui précède. Nous nous contenterons d'en donner un exemple.

Soit un conducteur mobile de forme rectangulaire (*fig.* 284 *bis*) : si les pointes x, y sont placées dans des coupes qui communiquent avec les deux pôles de la pile, de manière que la pointe x soit dans la coupe positive, le courant suivra la direction $x a b c d e f y$.

Examinons l'action qui sera produite sur le conducteur mobile par un courant indéfini $M N$: nous supposons que la direction de $M N$ soit d'abord perpendiculaire au plan du rectangle, dont les parties $a b$, $c d$, $e f$ sont horizontales, tandis que les deux branches $b o$, $d s$ sont verticales. Menons par $M N$ un plan vertical qui coupe respectivement $a b$, $c d$ en deux points p, q situés sur la verticale $p q o$ et placés sur $a b$ et $c d$ d'une manière quelconque.

Cela posé, le courant ascendant $d e$ est dirigé vers N par le courant fixe $M N$ (p. 197, 3°). Le courant descendant $b c$ est porté en sens opposé, c'est-à-dire vers M, en sorte que le rectangle $b c e d$

tournera autour de l'axe vertical passant par les coupes x et y. Les parties horizontales $d\ q$ et $c\ q$ tendent aussi à se mettre parallèles à $M\ N$. Enfin les portions $e\ f$, $a\ b$ tendent bien à produire des effets contraires à ceux qu'on vient de décrire, mais ces effets sont trop faibles à cause de la distance pour contrebalancer les premiers. Ainsi le conducteur mobile sera amené dans un plan parallèle à $M\ N$.

Lorsque le conducteur mobile est dans un tel plan, les effets produits sur les branches verticales $b\ c$, $d\ e$ se détruisent; car les forces que $M\ N$ exerce sur $b\ e$, $d\ e$ sont toujours parallèles à sa direction, puisque les courans ne cessaient pas de lui être perpendiculaires dans le mouvement que nous venons de décrire : elles sont d'ailleurs opposées; et il est évident, en outre, qu'elles sont égales lorsque leur plan est parallèle à $M\ N$. En vertu de la pesanteur, le plan du conducteur mobile rectangulaire s'approche d'être vertical; il ne l'est pas rigoureusement, parce que les deux branches horizontales, devenues parallèles à $M\ N$, éprouvent encore l'influence de ce courant, l'inférieure tend à s'en approcher, et la supérieure à s'en éloigner : comme la première est la plus voisine du conducteur indéfini, il en résulte que le plan $a\ d\ c\ d\ e\ f$ s'incline un peu vers ce conducteur.

On peut le rendre tout-à-fait vertical, en plaçant l'axe de rotation $x\ y$ au-dessus de $M\ N$.

Lorsque le conducteur mobile occupe la position d'équilibre où le conducteur indéfini tend à l'amener, la partie horizontale inférieure est évidemment dirigée de M vers N dans le sens du courant fixe. Si le courant $c\ d$ était en sens contraire de celui de $M\ N$, l'équilibre ne serait pas stable; et aussi quand on vient à changer le sens du courant du conducteur mobile, sans toucher au conducteur fixe, on voit aussitôt le premier faire une demi-révolution, et se retourner de manière à ce que la partie inférieure en soit dans le sens $M\ N$ et non dans le sens $N\ M$.

479. Il est essentiel d'observer que toutes les circonstances du mouvement du conducteur mobile sont dues spécialement à l'action des branches verticales. C'est surtout par leur influence qu'il se met dans un plan parallèle à $M\ N$; l'effet des courans horizontaux se borne à incliner un peu vers $M\ N$ ce plan d'équilibre, lorsque le courant fermé n'est pas dans le plan vertical qui passe par $M\ N$. Maintenant il est aisé d'étendre à un conducteur fermé quelconque les résultats que nous venons d'obtenir par le raisonnement, et de vérifier par l'expérience pour un conducteur mobile rectangulaire.

Substituons en effet au conducteur rectangulaire dont nous nous sommes servi, le conducteur plan fermé quelconque (*fig.* 297), sur lequel nous ferons toujours agir le courant $M\ N$; soit $n\ m$ un élément pris à volonté sur le circuit fermé : par les extrémités m n de cet élément, je tire la verticale $n\ p$ et l'horizontale $m\ p$, et j'observe que le petit courant $m\ n$ peut être remplacé par ses deux projections $m\ p$, $n\ p$, formant un courant sineux $m\ n\ p$ qui s'en écarte très peu et se termine aux mêmes extrémités. On peut appliquer la même considération à tous les élémens du circuit fermé, et remplacer ainsi ce circuit par une série d'élémens verticaux et d'élémens horizontaux, auxquels on appliquera tout ce qu'on a dit des branches verticales et des branches horizontales du conducteur mobile rectangulaire. Donc, l'action du courant indéfini $M\ N$ sur un conducteur mobile fermé quelconque tend à amener le conducteur dans une position d'équilibre stable telle que son plan soit parallèle à $M\ N$, et que de plus le courant de sa partie inférieure soit dans le sens $M\ N$.

Si l'on imagine actuellement un système mobile composé de courans fermés, dont les plans soient parallèles, et si l'on regarde ce système comme ayant toutes ses parties liées entre elles invariablement, on conçoit que l'action du courant $M\ N$ sur un tel assemblage tendra encore à amener tous les plans dont il se compose dans une direction parallèle à $M\ N$. Cela est assez évident, puisque les actions individuelles exercées sur chacun des plans en particulier conspirent toutes à produire cet effet. Il est bien entendu que nous supposons tous les courans dirigés dans le même sens.

Pour fixer les idées, imaginons que ces courans soient par exemple des cercles assemblés à des distances égales sur un même axe, passant par leurs centres et perpendiculaire à leurs plans. Le système ainsi obtenu a la forme d'un cylindre, et prend le nom de *cylindre électro-dynamique*. Or, tout ce que nous avons dit plus haut s'applique évidemment au cylindre électro-dynamique; un cylindre électro-dynamique est donc amené par l'action d'un conducteur indéfini $M\ N$, dans une position telle que tous les plans des courans qui le composent sont parallèles à $M\ N$.

Il est même, dans ce cas, bien facile d'annuler complètement l'action des élémens horizontaux du système, afin de n'avoir plus à considérer que l'action de ses élémens verticaux. Pour bien comprendre cela, rappelons-nous qu'à chaque élément $m\ n$ (*fig.* 297) de courant fermé, nous pouvons en substituer la projection horizontale $m\ p$ et la projection verticale $n\ p$; les actions des parties horizontales $n\ p$ se détruiront si l'on suspend le cylindre au-dessus de $M\ N$ par le milieu, et si on le place dans une situation telle, que l'axe en soit normal à $M\ N$. En effet, de chaque côté de $M\ N$ il y aura sur l'axe deux cercles équidistans, et en prenant sur ces deux cercles deux élémens horizontaux homologues, on conçoit que ces deux élémens exerceront des actions égales et de signes contraires. Il ne reste que celles des élémens verticaux qui tendraient à donner au conducteur mobile la position assignée, s'il ne l'occupait déjà.

En résumé, un cylindre électro-dynamique est

dans un état d'équilibre au-dessus d'un conducteur horizontal indéfini, qui est perpendiculaire à son axe, et qui est situé symétriquement par rapport aux deux extrémités de cet axe; pour que l'équilibre soit stable, il faudra en outre, d'après ce qui précède, que les courans des parties inférieures des cercles soient dans le sens des courans du conducteur fixe; il est instable dans le cas contraire; ce qu'on vérifie par l'expérience.

480. Ce qui précède nous conduit naturellement aux *solénoïdes*. M. Ampère a nommé *solénoïde* un système de petits courans fermés, égaux et équidistans, dont les plans sont normaux à une ligne donnée quelconque, droite ou courbe, sur laquelle leurs centres sont situés, et qui sert d'axe au *solénoïde*. On voit que le cylindre électro-dynamique, dont nous venons d'examiner les effets, n'est qu'un cas particulier du solénoïde, celui où l'axe du solénoïde est une droite; réciproquement on verra tout à l'heure qu'un solénoïde quelconque peut toujours être remplacé par un cylindre électro-dynamique construit sur la droite qui en joint les deux extrémités; les propriétés remarquables qui ont été reconnues dans le cylindre s'appliquent ainsi à un solénoïde quelconque.

Pour construire un solénoïde (*fig.* 298) sur un axe donné $A\ B$, il faut, d'après notre définition, partager cet axe en portions égales, puis, par les points de division, mener des plans normaux à la courbe, et tracer dans chaque plan, autour du point où il coupe l'axe $A\ B$, une petite courbe fermée constante, par exemple un petit cercle dont ce point serait le centre. Il paraît difficile au premier abord de réaliser physiquement un solénoïde pour vérifier par l'expérience les résultats du calcul; on y réussit toutefois, et d'une manière fort simple, en contournant un fil de la manière suivante : on forme d'abord un cercle $a\ b\ c$ presque exact (*fig.* 299); puis on tire une petite droite $c\ d$ perpendiculaire à son plan; on décrit un nouveau cercle $d\ e\ f$, et une nouvelle petite droite $f\ g$ dans le sens de la première, et ainsi de suite, jusqu'à l'extrémité A, où l'on s'arrête, et d'où l'on fait revenir le fil en ligne droite dans une direction $A\ B$ opposée à $c\ d, f\ g$,.... et en ayant soin que le fil $A\ B$ soit le plus près possible de $c\ d$, $f\ g$, dont il ne doit être séparé que par la soie qui le recouvre. Lorsque l'on fait passer dans un tel système un courant électrique, il est clair que les effets des parties $c\ d$, $d\ f$,.... sont détruits par les effets égaux de la partie $A\ B$, qui revient en sens contraire. Il ne reste donc que ceux des cercles $a\ b\ c$, $d\ e\ f$,.... qui sont tous construits égaux et normaux à une même droite $A\ B$, et composent par conséquent un solénoïde.

Quelquefois aussi on remplace les solénoïdes par des hélices continues, c'est-à-dire qu'on suppose qu'en pliant un fil en hélice d'une extrémité A à une extrémité B, et faisant revenir ensuite ce fil en ligne droite de B vers A, suivant l'axe de l'hélice, on aura un solénoïde. En effet, chaque élément de l'hélice peut être remplacé par une petite portion de la génératrice du cylindre, et une petite portion d'arc de cercle formant un circuit continu qui se termine aux extrémités de l'élément, et, si l'on ajoute les diverses parties de courant situées sur la génératrice qui sont ainsi obtenues par cette substitution, on voit que l'effet total en est sensiblement détruit par l'effet opposé du fil rectiligne, qu'on a fait revenir de B vers A dans l'intérieur de l'hélice. Restent les élémens successifs d'arcs de cercle, dont l'action doit en effet différer très peu de celle d'un solénoïde ayant $A\ B$ pour axe; mais quoique les hélices aient été souvent employés comme solénoïdes, il est évident qu'il vaut mieux faire usage de l'appareil plus exact et aussi simple qu'il vient d'être décrit.

Action réciproque des solénoïdes.

481. Avant d'énoncer les résultats auxquels le calcul a conduit relativement à l'action mutuelle de deux solénoïdes entre eux, et d'un solénoïde sur un élément de courant, il est bon de faire connaître les noms qu'on donne aux extrémités ou pôles de ce solénoïde. Nous verrons par la suite que les solénoïdes, comme les aimans, sont dirigés par l'action de la terre; en sorte qu'un de leurs pôles est porté vers le pôle boréal de la terre : or nous donnerons le nom de pôle austral à celle des deux extrémités du solénoïde qui se dirige vers le nord, et réciproquement le nom de pôle boréal à celle qui se dirige vers le sud.

Reprenons maintenant l'analyse des propriétés du solénoïde. Nous trouverons d'abord, en effectuant l'expérience dont la théorie a été donnée n° 478, nous trouverons, dis-je, qu'un solénoïde dont la ligne qui joint les pôles est horizontale, est dirigé par un conducteur rectiligne indéfini, placé au-dessous de son milieu, de manière que cette droite forme un angle droit avec la direction du conducteur, et que son pôle austral soit à gauche du courant qui le parcourt (d'après la règle n° 436); que dans cette situation il attire le solénoïde, et qu'il le repousse lorsque son pôle austral est à droite du même courant; nous trouverons aussi que deux solénoïdes se repoussent par les pôles de mêmes noms et s'attirent par les pôles de noms contraires, le tout précisément comme les aimans. Tous ces faits d'expériences sont déduits du calcul; mais le calcul conduit en outre à divers théorèmes qu'il serait difficile de découvrir par l'observation; et qui sont tous fondés sur la formule générale (1), par laquelle

(1) En nommant i, i' les intensités, ds, ds' les grandeurs des deux élémens, r leur distance, ε leur angle, θ, θ' les angles qu'ils font avec la droite qui joint leurs milieux, l'action mutuelle des deux élémens est représentée par $\dfrac{i i' ds ds'}{r^2}(\cos\varepsilon - 3/2 \cos.\theta \cos.\theta')$.

M. Ampère représente l'action mutuelle de deux élémens de fil conducteur.

Voici ces théorèmes divers énoncés dans l'ordre où ils se présentent naturellement.

Le premier fait consiste en ce que les portions contiguës d'un même solénoïde s'attirent réciproquement. Si donc on considère, pour fixer les idées, un solénoïde rectiligne ou un cylindre électro-dynamique indéfini dans les deux sens A et B; puis qu'on partage ce solénoïde en deux parties par un plan perpendiculaire à son axe (*fig.* 298), et qu'on écarte ces deux parties l'une de l'autre en les faisant glisser le long de cette droite, on obtiendra deux solénoïdes $A' B'$ et $A'' B''$, indéfinis chacun dans un sens et qui s'attireront nécessairement, puisqu'en prenant un cercle sur l'un et sur l'autre, les courans de ces deux cercles iront dans le même sens et ne pourront produire qu'une attraction. Il est aisé de voir en outre que les extrémités A' et B'' des deux solénoïdes seront de noms contraires, car pour les placer à côté l'un de l'autre de manière à les rendre indéfinis du même côté, il faudrait évidemment retourner l'un des deux; leurs courans, qui actuellement vont dans le même sens, iraient donc en sens contraire après ce renversement.

Il est aisé de voir que l'action réciproque des deux solénoïdes indéfinis, situés, comme ci-dessus, de manière que les axes en soient sur une même droite $A' B''$, est dirigée suivant cette droite, car cela a lieu pour les actions individuelles de deux cercles pris respectivement sur l'un et sur l'autre, à cause de la symétrie de la figure. Le calcul montre en outre que la valeur de cette action est en raison inverse du carré de la droite $B' A''$ qui joint les pôles. Cette force toutefois n'émane pas des pôles eux-mêmes, mais de la totalité des solénoïdes; c'est la résultante des forces produites par tous les cercles de l'un d'eux sur tous les cercles de l'autre. En sorte que *l'action des pôles d'un solénoïde* est une expression abrégée.

Si maintenant on fait tourner les deux solénoïdes d'une manière quelconque autour de leurs pôles B' et A'' supposés fixes, et si l'on donne à leurs axes une courbure quelconque, pourvu qu'on n'altère ni l'écartement, ni la grandeur des cercles dont ils sont composés, le calcul montre que leur action réciproque reste la même malgré tous ces changemens de forme et de position.

On transformera les pôles de noms contraires en pôles de mêmes noms, en renversant le sens du courant dans l'un des solénoïdes, ce qui rendra l'action répulsive sans en changer l'énergie, conformément à une de nos premières expériences (n° 476).

Un solénoïde défini $A B$ (*fig.* 307) peut toujours être considéré comme la différence de deux solénoïdes indéfinis $A B C$, $B C$, ayant leurs courans dirigés en sens contraires, et dont la partie $B C$ du premier est complètement superposée au second : car il est clair que les effets opposés produits par les courans de cette partie commune se détruisent, en sorte qu'il revient tout-à-fait au même de considérer le solénoïde $A B$ ou les deux solénoïdes indéfinis $A B C$ et $B C$.

Voilà pourquoi on dit que l'action d'un solénoïde défini ne dépend que de la position de ses extrémités, et est tout-à-fait indépendante de la figure affectée par son axe entre ces deux points; voilà aussi pourquoi les actions que l'on attribue à ses pôles sont de signes opposés. En effet, les pôles des deux solénoïdes indéfinis que l'on substitue au solénoïde défini sont nécessairement de noms contraires, puisque les courans de ces deux solénoïdes ont respectivement des directions inverses. De plus, on vient de voir que l'action d'un solénoïde indéfini dépend uniquement de la position du pôle de ce solénoïde; donc l'action des deux solénoïdes indéfinis substitués au solénoïde $A B$ demeurera invariable, quelle que soit la manière dont on contourne l'axe de $A B$ entre les points A et B, supposés fixes. On peut donc toujours remplacer, comme on l'a avancé plus haut, un solénoïde quelconque par un cylindre ayant les mêmes pôles, et dont l'axe serait par conséquent la droite qui joint ces pôles.

On conclura aisément de ce qui précède que l'action de deux solénoïdes $A B$, $A' B'$ (*fig.* 300) se réduit à quatre forces dirigées suivant les droites $A A'$, $B B'$, $A B'$, $B A'$; les deux premières étant répulsives parce qu'elles s'exercent entre les pôles de mêmes noms, et les deux autres attractives parce qu'elles s'exercent entre les pôles de noms contraires; chacune de ces forces ayant une valeur réciproquement proportionnelle au carré de la distance correspondante.

Un théorème encore démontré par le calcul, et qu'on peut regarder comme un corollaire de ce qui précède, est celui qui est relatif aux solénoïdes fermés. Il consiste en ce que, si les extrémités d'un solénoïde $A H B$ se rejoignent de manière à ce qu'il en résulte un solénoïde fermé $A' H' B'$ (*fig.* 301), ce solénoïde sera alors sans action, soit sur un autre solénoïde, soit sur un élément de fil conducteur.

Action des solénoïdes sur les fils conducteurs.

482. Nous n'avons parlé jusqu'ici que de l'action des solénoïdes entre eux, mais on s'occupe aussi de l'action des solénoïdes sur les fils conducteurs, et en particulier sur un élément de courant électrique. Comme nous avons donné le moyen de remplacer dans tous les cas l'action d'un solénoïde défini par celle de deux solénoïdes indéfinis, nous pouvons nous borner à examiner l'action d'un solénoïde indéfini $A B$ (*fig.* 302) sur un élément $m m'$ de courant, et même substituer à ce solénoïde un cylindre électro-dynamique $A C$, dont l'axe soit le prolongement de la droite $I A$, menée du pôle A donné au milieu de l'élément $m m'$.

On voit donc qu'il s'agit de déterminer l'action

exercée par un cylindre électro-dynamique indéfini $A\ C$, sur un élément $m\ m'$, dont le milieu I est sur le prolongement de $A\ C$; cet élément peut faire avec la droite $A\ I$ un angle donné quelconque; mais nous examinerons d'abord les deux cas simples où il est dirigé suivant l'axe du cylindre, et où il est perpendiculaire à cet axe.

Le premier cas se rapporte à la *fig.* 303, et il est aisé de prouver que l'action produite est nulle alors entre le solénoïde et l'élément $m\ m'$, et même qu'elle est nulle entre cet élément et un arc infiniment petit $p\ p'$ pris à volonté sur un quelconque des cercles dont le cylindre se compose. En effet, si par le milieu de cet arc $p\ p'$ et par l'axe du cylindre, on mène un plan, ce plan sera normal à l'arc : donc le petit courant $p\ p'$, dont on considère l'action sur $m\ m'$, est tel que $m\ m'$ se trouve dans un plan perpendiculaire à son milieu; or, on peut établir que tout courant infiniment petit est sans action sur un autre courant $m\ m'$ qui passe dans un plan perpendiculaire au milieu du premier.

Soient pour le prouver (*fig.* 304), deux élémens égaux $M\ M'$, $N\ N'$ situés sur une droite $M\ O\ N$ normale au plan $P\ Q$, également éloignés du point O et allant à la rencontre l'un de l'autre; si les deux courans $M\ M'$, $m\ m'$ vont tous les deux en s'approchant du pied de leur commune perpendiculaire $O\ K$, il est évident que la même chose a lieu aussi pour $N\ N'$ et $m\ m'$; donc les actions respectives de $M\ M'$ et $N\ N'$ sur $m\ m'$ sont de même signe; j'ajoute qu'elles sont égales à cause de l'égalité des longueurs $N\ N'$, $M\ M'$ et des distances $M\ O$, $N\ O$. Si maintenant on imagine que $M\ M'$ et $N\ N'$ soient transportés le long de $M\ O\ N$ à la rencontre l'un de l'autre d'un mouvement uniforme, et qu'après être arrivés en O ils dépassent ce point, les actions qu'ils exercent sur $m\ m'$ ne cesseront pas d'être égales et de même signe entre elles, puisqu'elles en auront changé toutes les deux; en sorte qu'il en doit être encore ainsi au moment de leur passage lorsque leurs milieux coïncident avec le point O; mais alors il est évident, par un fait d'expérience dont nous avons souvent fait usage, que les deux actions, si elles existaient, seraient égales et de signes contraires; puisque les deux courans $M\ M'$, $N\ N'$, ont des directions opposées; chacune d'elles en particulier est donc nulle. De plus, lorsque les élémens $M\ M'$, $N\ N'$, ont leur milieu en O, le plan $P\ Q$ où se trouve $m\ m'$ leur est perpendiculaire en leur milieu : donc un élément de courant n'exerce aucune action sur un autre élément situé dans un plan perpendiculaire au milieu du premier. Donc aussi l'élément $m\ m'$ de la *fig.* 303 est sans action sur $p\ p'$, et partant sans action sur le cylindre $A\ C$.

Passons au cas représenté *fig.* 308, où la ligne $I\ A$ est normale à $m\ m'$. Pour fixer les idées, supposons le plan $A\ I\ m'$ horizontal; menons ensuite par l'axe $C\ A\ I$ du cylindre un plan vertical, qui sera par conséquent perpendiculaire à $m\ m'$: nous partagerons ainsi le solénoïde en quatre parties ou régions, qui exerceront sur $m\ m'$ des actions diverses qu'il s'agit d'analyser. Dans ce but, simplifions d'abord la chose en ne considérant qu'un des cercles du solénoïde, et prouvons que la résultante des actions de ce cercle sur l'élément est normal au plan $A\ I\ m'\ m$.

Pour cela jetons les yeux sur la *fig.* 309, où l'on a représenté les quatre cadrans correspondant aux régions tout à l'heure distinguées dans le solénoïde; en prenant dans ces cadrans quatre élémens égaux et semblablement situés $a\ a'$, $b\ b'$, $c\ c'$, $d\ d'$, on verra sans peine que deux d'entre eux $a\ a'$, $d\ d'$, attirent l'élément donné tandis que les deux autres $b\ b'$, $c\ c'$, le repoussent avec des forces égales.

Si donc l'élément $m\ m'$ était situé dans le plan même du cercle, la force répulsive produite par $c\ c'$ s'ajouterait à la force attractive de $a\ a'$ et en doublerait l'effet : la force répulsive de $b\ b'$ doublerait de même l'effet attractif de $d\ d'$. Les forces attractives se composeraient ensuite en une seule, dirigée suivant $I\ L$ perpendiculaire à $m\ m'$, et tendant de I vers L. Il en serait de même des forces répulsives.

Si l'on conçoit actuellement l'élément $m\ m'$ placé, comme il doit l'être, un peu en avant du plan du cercle, en sorte que ce soit la projection qui en soit représentée dans la figure, on voit que les quatre actions partielles se composeront encore en une seule qui tendra dans le sens $I\ L$ (les composantes, dirigées suivant la normale au plan du cercle, se détruisant mutuellement), et qui sera dirigée suivant la droite passant par le milieu de $m\ m'$ perpendiculairement à cet élément et parallèlement au plan du cercle, parce que les quatre forces égales qui servent de composantes sont évidemment distribuées d'une manière symétrique autour de cette droite, qui ne diffère pas de la perpendiculaire menée par le milieu de l'élément au plan horizontal $A\ I\ m'$ construit tout à l'heure.

Il est donc prouvé que quand l'élément $m\ m'$ est dans une direction normale à l'axe du cylindre, l'action du cylindre sur cet élément se réduit à une force unique passant par le milieu de $m\ m'$ et perpendiculaire au plan du secteur ayant pour base $m\ m'$ et pour sommet le pôle A.

Il nous reste à considérer le cas général (*fig.* 310) où l'élément $m\ m'$ fait un angle quelconque avec l'axe du cylindre; mais ce cas se ramène aux deux précédens, car si l'on projette $m\ m'$ sur l'axe en question et sur une normale à cet axe menée dans le plan $A\ m\ m'$, on pourra substituer à l'élément $m\ m'$ ses deux projections, qui composent évidemment un petit courant sinueux, très peu écarté de $m\ m'$ et se terminant aux mêmes points m et m', ainsi qu'on le voit par la *fig.* 310. Dans cette figure $L\ I\ L'$ représente la normale à l'axe $C\ A\ I$ du cylindre menée dans le plan $A\ m\ m'$; $m\ n$ et $m'\ n'$ sont deux perpendiculaires à cette droite : $n\ n'$ est donc une des projections de $m\ m'$, dont il est question,

et les deux petites droites $m\,n$, $m'\,n'$, composent l'autre. L'élément $m\,m'$ se trouve ainsi remplacé : 1° par les deux petits courans $m\,n$ et $m'\,n'$, qu'on peut regarder comme agissant en I le long de l'axe du cylindre dont ils sont infiniment rapprochés et dont la direction leur est parallèle : d'après ce qu'on a vu tout à l'heure le cylindre est sans action sur eux; 2° par le courant $n\,n'$ perpendiculaire à $C\,A\,I$ sur lequel le cylindre agit avec une force normale au plan $A\,I\,m$.

Donc, en résumé, l'*action d'un cylindre ou plutôt l'action d'un solénoïde indéfini quelconque, ayant son pôle au point* A, *sur un élément quelconque* m m', *se réduit à une force perpendiculaire au plan du secteur* A m m', *laquelle passe par le point* I *milieu de* m m'.

Quant à l'intensité de cette force, tout ce que l'on peut voir par la construction précédente, c'est qu'elle est, pour une même distance $A\,I$, proportionnelle au sinus de l'angle $A\,I\,m'$, puisque l'élément $m\,m'$ n'agit que comme sa projection $n\,n'$, et que l'on a par les propriétés des projections,

$$m\,m' \sin. I\,m'\,n' \text{ ou } m\,m' \sin. A\,I\,m' = n\,n' :$$

mais voici la règle générale démontrée par les géomètres : *la force est toujours proportionnelle au secteur* A m m', *ayant pour sommet le pôle* A *et l'élément* m m' *pour base, et en raison inverse du cube de la distance* A I (1).

Tels sont les principaux résultats obtenus par le calcul relativement à l'action soit des solénoïdes entre eux, soit d'un solénoïde et d'un élément de courant; on a déjà sans doute remarqué l'analogie singulière qu'ils établissent entre les solénoïdes et les aimans. Nous verrons en effet par la suite qu'on peut, en regardant les aimans comme des solénoïdes, expliquer les phénomènes magnétiques, et ramener ainsi à une cause unique ces phénomènes et ceux de l'électricité.

483. *Loi des intensités des courans.* MM. Biot et Savart ont cherché par la voie de l'expérience la loi suivant laquelle varie, par rapport à la distance, l'action d'un courant. Pour cela, ils ont fait osciller pendant le même temps une aiguille aimantée très courte, présentée à l'action d'un courant vertical dont on faisait varier la distance; la longueur du fil était assez grande pour que les extrémités de celui-ci fussent sans action sur l'aiguille; cette disposition représentait un fil indéfini. L'aiguille, rendue astatique par la présence d'un aimant placé dans le méridien magnétique, se mettait, après un certain nombre d'oscillations, dans une direction perpendiculaire à celle du courant; puisque les deux parties verticales du fil exerçaient des actions égales sur l'aiguille, la résultante de ces actions devait se trouver dans le plan horizontal. L'expérience ayant appris que les diverses oscillations pour une même position du courant étaient isochrones, la force qui sollicitait l'aiguille était nécessairement proportionnelle à l'angle d'écartement sur la direction finale, d'où il résultait que la formule du pendule était ici applicable, et conséquemment la force du courant était proportionnelle au carré du nombre d'oscillations faites dans un temps donné (n° 24). En calculant, d'après les résultats des expériences, *la force totale du courant sur un élément magnétique austral ou boréal*, on trouve qu'elle est *en raison inverse de la distance de cet élément au courant.*

Cette loi relative à la résultante totale des élémens magnétiques de l'aiguille et du courant étant connue, M. de Laplace en déduisit qu'il fallait que l'*action de chaque élément du courant sur l'élément magnétique fût en raison inverse du carré de la distance;* mais comme la loi relative à la distance pouvait être modifiée par la direction de chaque distance sur la direction générale du fil, il restait à voir si le coefficient existait réellement et quelle en était la composition. Pour le savoir, MM. Biot et Savart ont disposé l'expérience de la manière suivante : les deux parties $m\,o$ et $o\,n$ (*fig.* 321) étaient également inclinés à l'horizon, la distance du point o à l'aiguille était constante, et l'on faisait varier l'angle $m\,o\,n$ dans chaque expérience : de plus on observait alternativement l'action du fil plié $m\,o\,n$ et d'un fil semblable rectiligne $m'\,o\,n'$. L'expérience a montré que l'action totale varie proportionnellement à la tangente de la moitié de l'angle $m\,o\,F$, ou à la tangente du quart de l'angle que forment les deux fils, d'où l'on tire que l'action d'un élément de courant sur le pôle d'un aimant ou sur un élément austral ou boréal, varie proportionnellement au sinus de l'angle que fait la direction du courant avec la ligne qui joint le pôle de l'aimant ou l'élément magnétique, et le milieu de l'élément de courant. D'où l'on voit que la loi de l'action d'un élément sur le pôle d'un aimant obtenue de l'expérience, est la même que celle d'un élément de courant sur les extrémités d'un solénoïde, déduite par le calcul de la formule qui représente l'action mutuelle de deux élémens de courant (1).

(1) En faisant $A = r$, l'angle $A\,I\,m' = \theta$, et nommant en outre $d\,s$ la longueur $m\,m'$, on peut encore représenter cette force par l'expression $\frac{i\,d\,s \sin. \theta}{2\,r^2}$, où la constante i est proportionnelle à l'énergie de la pile. Cette valeur est équivalente à celle qui est indiquée dans le texte, car le triangle $A\,m\,m'$ a pour base ds, et pour hauteur $= r \sin. \theta$. On a donc $A\,m\,m' = \frac{r\,d\,s \sin. \theta}{2}$ ce qui donne

$$\frac{i\,A\,m\,m'}{r^3} = \frac{i}{2}\,\frac{d\,s \sin. \theta}{r^2}$$

(1) Soient $O\,D = s$ une certaine étendue du fil, $A\,O = d$, $A\,D = r$; i l'intensité du courant, *fig.* 322 *bis*, pour $\omega = A\,D\,O = 100°$, et pour l'unité de distance; supposons que l'action d'un élément ds situé en D soit

Expériences sur l'action mutuelle des aimans et des courans.

484. *Révolution continue d'un fil conducteur autour d'un aimant.* Dans l'expérience décrite plus haut, page 198, où le conducteur $s\,p$ (*fig.* 285 *bis*) tourne d'un mouvement continu autour de l'axe $G\,H$ représentée par $s' = \frac{i \sin. \omega . d\,s}{r^2}$ (A). Si cette formule conduit par une suite de transformations légitimes aux deux lois de l'expérience, il faudra en conclure qu'elle est l'expression de la vérité.

On va chercher r et $d\,s$ en fonction de l'angle ω. On mène du pôle A une perpendiculaire AG sur $O\,D$ prolongé. Le triangle ADG donne

$A\,D$ ou $r : AG :: 1 : \sin. \omega$, d'où $r = \frac{A\,G}{\sin. \omega}$

De même $A\,O\,G$.

$AG : AO = a :: \sin. \alpha : 1$, d'où $AG = a \sin. \alpha$.

De même ADO.

$AD : DO :: \sin \alpha : \sin. DAO = \sin. (\alpha - \omega)$ d'où $s = \frac{r \sin. (\alpha - \omega)}{\sin. \alpha}$.

D'où $s = \frac{a \sin. (\alpha - \omega)}{\sin. \omega}$, ou en développant $\sin. (\alpha - \omega)$, $s = \frac{a\,(\sin. \alpha \cos. \omega - \cos. \alpha \sin. \omega)}{\sin. \omega}$ $= \frac{a \sin. \alpha}{\text{tang.}\,\omega} - a \cos. \alpha$. En différentiant cette équation pour avoir $d\,s$, on a $d\,s = -\frac{a \sin. \alpha\, d\,\omega}{\sin.^2 \omega}$. Il faut remarquer que a et α sont des constantes.

Si l'on substitue cette valeur dans (A), il vient $-\frac{i\,a \sin. \alpha\, d\,\omega}{r^2 \sin. \omega}$ où $i - \frac{i \sin. \omega\, d\,\omega}{a \sin. \alpha}$.

Cette expression intégrée devient $\frac{i \cos. \omega}{a \sin. \alpha} + c$.

On prend cette intégrale depuis $\omega = o$ jusqu'à $\omega = \alpha$ pour avoir toute l'action du fil OD, on obtient $\frac{(1 - \cos. \alpha)\, i}{a \sin. \alpha}$, expression qui doit être encore transformée pour être soumise à quelques vérifications. La trigonométrie apprend que $1 - \cos. \alpha = 2 \sin.^2 1/2\, \alpha$ et $\sin. \alpha = 2 \sin. 1/2\, \alpha \cos. 1/2\, \alpha$, d'où $\frac{i \sin. 1/2\, \alpha}{a \cos. 1/2\, \alpha} = \frac{i\, \text{tang.}\, 1/2\, \alpha}{a}$.

Si l'on suppose $\alpha = 100^\circ$ $1 \text{ tang.}\, 1/2\, \alpha = 1$, on a : $\frac{i}{a}$ ce qui indique que l'action d'un fil vertical sur une aiguille horizontale est en raison inverse de la distance (première loi trouvée), $\frac{2\, i\, \text{tang.}\, 1/2\, \alpha}{a}$ représente l'action du fil indéfini $m\,o\,n$ pour une distance constante a, elle est proportionnelle à la tangente de la moitié de $\alpha = m\,o\,F$ (deuxième loi trouvée).

par l'action d'un conducteur fixe, plié en cercle autour du vase $E\,D$, on peut remplacer ce dernier conducteur fixe par un aimant vertical dont les courans se meuvent dans le même sens. Si par exemple le courant dans le conducteur fixe circulaire se meut ainsi, nord, est, sud, ouest, on pourra le remplacer par un aimant situé comme on le voit en $A\,B$ (*fig.* 306), de manière que le pôle austral A de l'aimant soit en bas, car alors, d'après ce que nous avons dit, les courans de l'aimant vont aussi dans le sens nord, est, sud, ouest; si le pôle austral était en haut le mouvement aurait lieu en sens inverse; nous supposons ici, comme dans l'expérience de la page 198, que le courant aille en descendant dans le conducteur mobile. L'action de l'aimant, comme celle du conducteur fixe, reste la même sur ce conducteur mobile, quelles que soient la grandeur et la forme de celui-ci, pourvu que les deux extrémités en soient toujours aux mêmes points; et de même que le courant circulaire fixe, l'aimant ne peut produire le mouvement de révolution continue quand le conducteur mobile a ses deux extrémités dans l'axe $G\,H$, ou qu'il forme un circuit fermé.

Le même effet a eu lieu quand on incline l'aimant en lui donnant une position telle que $A'\,B'$: le pôle B' restant toujours dans l'axe, on peut même placer cet aimant dans la situation horizontale $A''\,B''$. Seulement il n'y a, dans ce dernier cas, que les parties supérieures des courans de l'aimant qui tendent à faire tourner le conducteur mobile dans le sens où il se meut réellement; les courans de la partie inférieure tendent évidemment à le faire tourner en sens opposé; et ce n'est que la différence de ces deux actions qui détermine le mouvement. On le rend plus rapide, on place au-dessous du vase $E\,D$ des aimans disposés comme les rayons d'une étoile, de manière qu'ils aient tous dans l'axe $G\,H$ les extrémités du même nom.

On peut faire ces différentes expériences sans pile galvanique. Il suffit pour cela que le vase $E\,D$ (*fig.* 306 *bis*) soit en zinc ainsi que la traverse $O\,V$ $E\,D$ à laquelle est soudée la tige de cuivre $G\,H$ qui porte la coupe H dans laquelle plonge la pointe s : l'action électro-motrice qui s'exerce en G produit un courant qui passe du zinc dans l'eau acidulée du vase et de là dans le conducteur mobile : le courant de ce conducteur est donc toujours ascendant, et celui-ci tourne conséquemment dans le sens nord, est, sud, ouest, lorsque le pôle boréal est en haut, ou dans l'axe quand l'aimant est horizontal.

485. *Révolution continue d'un aimant par un courant autour d'une ligne parallèle à son axe.* On emploie pour cette expérience l'appareil *fig.* 314. $A\,B$ est un barreau aimanté, lesté par un appendice $A\,D$ en platine. Il plonge dans une éprouvette remplie en partie de mercure. Un conducteur $c\,d$ pénètre au milieu de la surface du bain; l'autre fil de la pile communique avec un anneau $m\,n$, plongeant

aussi dans le mercure. L'aimant tourne aussitôt que la pile est mise en action.

Pour concevoir cette expérience, il faut remarquer qu'il s'établit à la partie supérieure du mercure un grand nombre de courans, dont les uns sont extérieurs à la surface du bain, et dont les autres le traversent. Soit *a b c* (*fig.* 312) une section de l'anneau *m n*, *r r'* une section de l'aimant, et *V* le centre des courans. Supposons ceux-ci dirigés du centre à la circonférence, et le pôle austral de l'aimant plongé dans le bain.

Soient d'abord deux courans tangens *V A* et *V A'*, le courant *V A'* attire la portion de chaque courant de l'aimant qui tourne sa convexité vers lui, parce que le mouvement a lieu dans le même sens, et repousse les autres parties, mais avec une force moindre, à cause de la plus grande distance. Au contraire, le courant *V A'* attire les courans les plus éloignés et repousse les plus voisins. L'action attractive du premier est dirigée suivant *r' x*, et l'action répulsive du second l'est suivant *r x*. Conséquemment la résultante de ces deux forces sera dirigée suivant *T T'*, perpendiculaire à *V x*, et poussera l'aimant dans le sens *T T'*. Deux autres courans *V B* et *V B'* auront aussi une résultante dans la même direction *T T'*, ainsi l'aimant décrira une courbe perpendiculaire à *V x*, c'est-à-dire un cercle.

Quant à chacun des courans qui traversent l'aimant, on peut le partager en trois portions ; l'une du point *V* à l'aimant, l'autre dans l'intérieur de l'aimant, et enfin la troisième depuis l'aimant jusqu'à l'anneau *a b c*. La seconde portion, ne produisant que des attractions et des répulsions réciproques entre les divers points de l'aimant, ne peut lui imprimer aucun mouvement. Mais en examinant les actions de la première et de la dernière portion par rapport à *V x*, on trouve que la résultante de ces actions est dirigée suivant *x T'*, (n° 476... 3°). Ainsi l'action des courans qui traversent le mercure tend à faire tourner l'aimant autour du point *V* dans le sens *x T'*. Si l'aimant était recouvert d'une substance isolante qui empêchât le courant électrique de la traverser, la seconde portion des courans dont nous venons de parler, et qui n'exerce aucune action, se trouverait transportée dans le mercure et son action se joindrait évidemment à celle des deux autres portions pour pousser l'aimant dans le même sens, ce qui ne changerait rien au sens de son mouvement et le rendrait seulement un peu plus rapide. Nous ne considérons pas ici l'action du reste du courant voltaïque, parce que la distance où il se trouve de l'aimant permet d'en négliger l'effet.

On a fait à l'explication précédente une objection qu'il est facile de lever. On sait, d'après M. Ampère, que l'action de deux circuits fermés ou de deux systèmes de circuits fermés ne peut imprimer à l'un d'eux un mouvement de rotation toujours dans le même sens. Or, dans le phénomène précédent, tous les courans qui traversent le mercure sans rencontrer l'aimant, font partie d'un circuit fermé. Ainsi la rotation ne proviendrait que des circuits interrompus qui traversent l'aimant, et si celui-ci était couvert d'un vernis isolant, la rotation ne devrait pas avoir lieu, ce qui est contraire à l'expérience. Mais il faut remarquer que le principe de M. Ampère n'est applicable qu'aux courans et aux systèmes de courans dont toutes les parties sont invariablement liées entre elles, et il n'a plus lieu si une partie quelconque du système est liquide.

486. *Rotation d'un aimant autour de son axe, par l'action d'un courant.* L'aimant est désigné par *A B* (*fig.* 313); il est surmonté d'un godet plein de mercure, destiné à recevoir une extrémité du conducteur de la pile; l'autre extrémité communique avec l'anneau qui entoure le mercure. Aussitôt que la pile est mise en action, l'aimant tourne rapidement sur lui-même en sens contraire de ses courans, si le courant de la pile est dirigé dans l'aimant de haut en bas. Le sens de ce mouvement change nécessairement si l'on change ou les pôles de l'aimant ou la direction du courant de la pile, et il reste le même, si l'on change à la fois la direction du courant et les pôles de l'aimant. On explique ce phénomène de la manière suivante : Soit *C D* (*fig.* 316) la section de l'aimant au niveau du mercure, *A B* son axe, et *a b c d* la section de l'anneau circulaire qui entoure le mercure. Nous indiquons la direction des courans dans l'aimant par les flèches. Les courans qui traversent l'aimant seront sans action sur lui, d'après ce qui a déjà été dit; il ne sera sollicité que par les courans qui traversent le mercure, et par le reste du circuit. Cette dernière partie étant beaucoup plus faible que l'autre, le sens de la rotation sera déterminé par celle-ci. Soit *C a* l'un de ces courans, tous les élémens de ce courant attirent les courans de l'aimant qui sont à droite, et repoussent ceux qui sont à gauche (n° 476); et comme tous les élemens de l'aimant sont deux à deux symétriquement placés par rapport au courant *C a*, la résultante en sera perpendiculaire à ce dernier, et dirigée en sens contraire des courans de l'aimant; ce qui est conforme à l'expérience. On pourrait encore expliquer le même phénomène en s'appuyant sur ce principe démontré par M. Ampère, que l'action d'un circuit circulaire est nulle sur un second circuit dont les deux extrémités sont dans l'axe du premier; car la portion du circuit extérieure à l'aimant produit un effet égal et opposé à celui que produirait dans l'aimant la portion du circuit qui le traverse, en supposant que le premier passe à travers des molécules indépendantes de l'aimant; mais cette dernière action doit faire tourner l'aimant sur lui-même dans le sens de ses courans. Ainsi l'effet contraire devant avoir lieu, l'aimant devra tourner dans un sens opposé à celui de ses courans. Voici une note qui renferme les prin-

cipaux résultats auxquels le calcul a conduit M. Ampère (1).

487. *Rotation d'un conducteur voltaïque sur son axe, au moyen d'un aimant.* La *fig.* 311 représente l'appareil, *m n* est une tige horizontale en cuivre, soutenue par un support isolant *A B*. A cette tige est fixée une boîte *L*, destinée à soutenir l'aimant : la partie inférieure de l'aimant est terminée par une pointe, qui plonge dans le godet *v* d'une tige de fer *a b*, lestée par un prolongement en platine; le restant de l'appareil est comme dans l'expérience précédente. Cette expérience rentre dans celle où l'aimant imprime au conducteur un mouvement de révolution continu (p. 204).

488. *Rotation du mercure par un aimant* (*fig.* 305) :

On introduit dans le fond d'un vase, et à la même hauteur, deux fils de cuivre polis et recouverts d'une matière isolante (à l'exception des extrémités). On remplit le vase de mercure, de manière à couvrir les fils. On fait communiquer l'extrémité inférieure de chacun de ces fils avec le pôle d'une pile en action; aussitôt que la communication est établie, on voit le mercure s'élever au-dessus des fils, d'où s'échappent des ondes dans toutes les directions. Si l'on approche le pôle d'un fort aimant, le mercure s'abaisse, et le mouvement de rotation commence; si l'on approche davantage encore, le mercure est déprimé. L'étain en fusion se comporte comme le mercure; il en serait nécessairement de même de tous les bons conducteurs.

Les deux courans dirigés dans les fils repoussent ceux qui sont établis de *m* en *m'*, puisqu'ils marchent en sens contraire, et qu'ils sont angulaires (n. 476); c'est pourquoi le mercure s'élève. Si l'on approche un aimant d'un des cônes, il tendra à faire tourner le mercure (n. 483), et la force centrifuge abaissera le cône formé; à un certain degré de vitesse, la surface deviendra plane et même concave.

De l'action de la terre sur les conducteurs voltaïques.

489. La terre dirige les aimans; ceux-ci agissent sur les conducteurs voltaïques. On devait donc s'attendre à voir la terre agir sur les conducteurs. Voici les différentes circonstances que cette action présente :

1° Un courant vertical, mobile autour d'un axe vertical, est porté par l'action du globe à l'est de cet axe lorsqu'il descend dans le conducteur mobile, et à l'ouest du même axe quand il va en montant; le plan qui dans la position d'équilibre passe par ce courant et par l'axe est dans les deux cas perpendiculaire au méridien magnétique. Il résulte de ce fait et du n° 476... 3° que, si l'action de la terre est due à des courans électriques, ils produisent les mêmes effets qu'un courant moyen dirigé dans le globe de l'est à l'ouest. Ce fait peut être constaté par l'expérience suivante :

Le conducteur mobile *x a b c d e y* (*fig.* 346) est composé d'un fil de cuivre plié comme on le voit dans cette figure. Une seule des pointes *x* et *y* touche le fond de la coupe dans laquelle elle est placée, et c'est sur elle que tourne librement le conducteur mobile dont on rend la partie *b c* verticale au moyen du contre-poids *x*. Les flèches indiquent le sens du courant, dans le cas où la branche *b c* marche vers l'est. Les deux branches horizontales

(1) Soit *AB* (*fig.* 317) un aimant soumis à l'action d'une portion de courant *m n*; soient θ_1 et θ_2 les angles que font avec l'axe de l'aimant les lignes menées du pôle *A* aux extrémités du courant; θ'_1 et θ'_2 les angles analogues pour le pôle *B*.

M. Ampère a trouvé que le moment de rotation de l'aimant est égal à $m(\cos.\theta_2 - \cos.\theta_1 - \cos.\theta'_2 + \cos.\theta'_1)$ (*a*), *m* étant une quantité proportionnelle à l'intensité du courant. Ainsi, le moment de rotation de l'aimant est indépendant de la forme et de la grandeur du courant, et ne dépend que de la position de ses extrémités.

L'expression (*a*) montre que l'action d'un circuit fermé serait nulle (*fig.* 318), car alors les points *m* et *n* coïncideraient, et l'on aurait $\theta_1 = \theta_2$, $\theta'_1 = \theta'_2$, ce qui réduirait à zéro le moment de rotation.

On obtiendrait encore le même résultat si le courant aboutissait à l'axe de l'aimant (*fig* 320), car dans ce cas on aurait

$$\theta_1 = 0,\ \theta'_1 = 0,\ \theta_2 = \pi,\ \theta'_2 = \pi.$$

Mais si le courant traversait l'aimant dans des points qui ne seraient pas sur l'axe, la portion du courant qui se trouverait dans l'aimant n'exercerait aucune action sur lui, et le reste du circuit tendrait à le faire tourner.

Si l'extrémité *m* du courant était dans le prolongement de l'axe (*fig.* 319), on aurait $\theta_1 = o$ et $\theta'_1 = o$, le moment se réduirait à

$$m\ (\cos.\theta_2 - \cos.\theta'_2).$$

Tant que l'extrémité *n* est au-dessus du plan horizontal mené par le pôle *A*, le moment ne renferme que la différence des cosinus, et il devient très petit quand ce point est très voisin de l'axe, parce qu'alors les deux cosinus diffèrent peu de l'unité.

Quand l'extrémité *n* est dans le plan horizontal mené par le pôle *A*, $\cos.\theta_2 = o$ et le moment se réduit à $-\mu \cos.\theta'_2$.

Quand l'extrémité *n* tombe entre le plan horizontal dont il est question et le pôle *B*, $\cos.\theta_2$ devient négatif, et le moment est $-\mu\ (\cos.\theta_2 + \cos.\theta'_2)$.

On peut facilement voir que si l'extrémité *n*, restant à la même hauteur, se rapproche de l'aimant, le moment augmente; et que s'il reste à la même distance, et qu'il s'abaisse, le moment atteindra son maximum, quand le point *n* sera au milieu de l'aimant; et enfin que la valeur du moment est la même quand l'extrémité *n* est à égale distance du milieu, au-dessus ou au dessous, la valeur du moment correspondante à l'extrémité *n*, supposée au milieu, est $-2\,m \cos.\theta'_2$, dont la valeur absolue est d'autant plus grande que *n* est plus près de l'axe de l'aimant.

Il résulte encore de l'expression du moment, que le sens de la rotation reste le même, quelle que soit la position du point *n*, et que la valeur de cette expression est très petite, quand ce point est au-dessus de l'aimant et très voisin de l'axe. On vérifie ces différens cas par l'expérience.

a b et *d c* ayant des courans en sens contraires, ne contribuent pas à la rotation de l'appareil.

2° Un conducteur horizontal (*fig.* 336) qui ne peut se mouvoir que parallèlement à lui-même, est toujours jeté (dans l'hémisphère boréal) par l'action du globe à la gauche d'un observateur, qu'on suppose placé dans le courant de manière que ce courant aille des pieds à la tête de l'observateur, et que celui-ci ait la face tournée vers le globe terrestre, quel que soit d'ailleurs l'azimut du courant. Si, par exemple, le courant est dirigé de l'est à l'ouest, on observe qu'il se porte au midi; et comme il est nécessairement attiré dans ce cas par le courant moyen équivalent à tous les courans terrestres, puisque ce courant va de l'est à l'ouest, il s'ensuit que ce dernier est placé au midi du lieu où se fait l'expérience.

Chacune des pointes *x* et *y* plonge dans une coupe pleine de mercure. On désigne le sens du courant en supposant la pointe *y* plongée dans la coupe positive. Il est visible que les actions exercées par la terre sur les deux branches verticales *x a*, *y b*, se détruisent, et que le mouvement qu'on observe est produit par la seule branche horizontale *a b*. On met le conducteur dans un plan sensiblement vertical au moyen du contre-poids *i*. Dans cette expérience, la branche *a b* est toujours portée à gauche du courant avec la même force, dans quelque azimut qu'on ait placé l'appareil, résultats conforme à ce que donne le calcul. Si le courant va de l'ouest à l'est, il est repoussé au nord par le courant terrestre.

3° Un conducteur horizontal (*fig.* 341) mobile autour d'un axe vertical passant par une de ses extrémités, tourne, par l'action de la terre, d'un mouvement continu qui a lieu dans cette direction, est, sud, ouest, nord, lorsqu'il va de la circonférence au centre, et en sens contraire quand il va du centre à la circonférence; il résulte encore de cette expérience, et de ce que nous avons dit n° 476, 3°, que le courant moyen est au sud du lieu de l'expérience. Dans cet appareil le cercle est entier, l'un des deux rayons ou les deux rayons peuvent être conducteurs. Dans le dernier cas, la vitesse est double. L'expérience se fait comme celle de la page 197. Les courans dans le liquide sont ici sans influence, puisque tout est symétrique de part et d'autre du rayon du cercle.

4° Un conducteur mobile (*fig.* 343) autour d'un axe vertical, et formant un circuit plan et presque fermé, prend, par l'action du globe, une situation telle que la partie où le courant est descendant se porte à l'est, et celle où il est ascendant à l'ouest.

Les mouvemens du cercle *fig.* 343 sont, dans certaines dispositions, gênés par ce mode de suspension; mais on peut remédier à cet inconvénient en remplaçant le cercle *fig.* 343 par le conducteur mobile *fig.* 344. L'anneau *a b* donne passage à un conducteur *P R S* venant d'une des extrémités de la pile qui supporte la coupe *S* dans laquelle plonge la pointe *s* sur laquelle doit tourner ce conducteur. La petite coupe *d*, à laquelle se termine le fil de cuivre dont est formé ce conducteur mobile, et qui par la pointe *s*, contient du mercure où plonge un fil de cuivre *d c* attaché, à l'aide de la pince *b*, à un fil conducteur qui communique avec l'autre extrémité de la pile. Ce nouveau mode de suspension permet au cercle de tourner dans tous les sens; et en changeant alternativement le sens du courant, on pourra même lui imprimer un mouvement de rotation continue.

5° Si l'on forme une hélice avec un fil conducteur *fig.* 347, et que l'axe horizontal de cette hélice puisse tourner autour d'une ligne verticale passant par son milieu, chaque anneau de l'hélice se dirige comme le circuit dont nous venons de parler, et l'axe de cette hélice, qui est sensiblement perpendiculaire au plan de ses anneaux, se trouve dirigé du nord au sud dans le plan du méridien magnétique, de manière que la partie de l'hélice où les courans descendent regarde l'est, et celle où ils montent l'ouest.

Conducteurs astatiques.

490. Dans les expériences sur l'action mutuelle des conducteurs, il arrive, lorsqu'on ne prend aucune précaution pour prévenir cet inconvénient, que l'action de la terre sur le conducteur mobile altère et peut même déguiser entièrement les effets produits par le conducteur fixe; c'est ce qui a porté M. Ampère à construire des conducteurs mobiles qu'il a nommés *astatiques*, et sur lesquels l'action de la terre est nulle, parce qu'ils sont composés de parties égales et symétriques, sur lesquelles les courans terrestres agissent en sens contraires avec des forces égales, la grande distance où ces courans sont de l'appareil empêchant qu'il n'y ait une différence appréciable entre ces actions. Le courant fixe, au contraire, étant beaucoup plus près d'une des deux portions symétriques que de l'autre, exerce sur celle qui en est le plus rapproché une action bien plus grande que sur la plus éloignée, et on peut facilement observer les effets de la première de ces deux actions, qui ne sont que peu altérés par les effets dus à la seconde.

Ainsi dans le conducteur mobile (*fig.* 332), le mouvement de l'électricité ayant lieu dans le sens *x a b c d e f g h i y*, le courant est descendant dans la partie *c d*, et ascendant dans la partie *g h*; elles tendent donc à se diriger avec des forces égales, l'une vers l'est, et l'autre vers l'ouest. De même aussi, l'action des courans horizontaux *d e* et *h i* est contre-balancée par l'action des courans opposés *b c f g*. Quant aux parties *a b* et *e f*, comme elles se trouvent dans l'axe de rotation, il est inutile d'y avoir égard.

En général, pour rendre un conducteur mobile astatique, quelle que soit la figure qu'on se propose de donner à la partie sur laquelle on fait agir le conducteur *fixe*, le moyen le plus simple et celui

qu'on emploie généralement consiste à faire en sorte qu'il se trouve dans ce conducteur une autre portion égale à la première, et que le courant traverse en sens opposé. C'est ce qu'on voit dans les conducteurs mobiles représentés *fig*, 333, 334, 335, 338.

De l'Aimantation produite par les courans électriques.

491. Peu de temps après avoir fait connaître à Paris la découverte de M. Œrstedt, M. Arago observa que le fil conducteur d'une pile de Volta se charge de limaille de fer, comme le fait l'aimant, et que celle-ci se détache aussitôt que la communication est interrompue. Cet effet ne doit pas être attribué à une action électrique ordinaire, puisque l'expérience ne réussit pas avec la limaille d'une substance non magnétique. De plus, il reconnut que le fil ne communique au fer qu'un magnétisme fugitif, tandis qu'il communique à l'acier un magnétisme durable; que l'aimantation est déterminée dans une direction perpendiculaire à celle du courant, c'est-à-dire dans la direction que prend l'aiguille quand elle est au-dessus ou au-dessous du courant; et que deux fils d'acier parallèles, formant un angle droit avec le fil conducteur et placés à des distances égales de part et d'autre de ce fil, acquièrent un même degré de magnétisme.

M. Arago, en plaçant une aiguille d'acier dans l'hélice imaginée par M. Ampère, obtint des aimans dont les pôles se renversaient si l'on répétait l'expérience en changeant la direction du courant. En introduisant un fil d'acier dans plusieurs hélices formées avec un même fil conducteur et tournées alternativement en sens contraires, il donna naissance à des points conséquens. Placés hors des hélices, les fils d'acier s'aimantaient à peine. Ils doivent d'ailleurs dans ce dernier cas s'aimanter en sens contraires. M. Arago fit d'abord ces expériences avec un courant continu; il montra ensuite que l'électricité ordinaire, passant par étincelles à travers les mêmes hélices, aimante également le fil d'acier.

M. Sturgeon de Wolwich, M. Moll, et enfin M. Henri d'Albany (Amérique), M. Eyke ont produit des aimans artificiels qui supportaient jusqu'à deux mille livres par ce procédé.

492. Tous ces faits particuliers se réduisent à un seul fait général, savoir, qu'une aiguille d'acier non aimantée, placée dans un solénoïde parcouru par un courant électrique instantané, présente, lorsqu'on la retire, précisément les actions attractives ou répulsives que présentait le solénoïde lui-même, à l'égard soit d'un fil conducteur, soit d'un autre solénoïde, soit du globe terrestre, et que c'est à ces propriétés que cette aiguille doit d'être un véritable aimant, en sorte qu'on est naturellement porté à croire, comme l'a établi M. Ampère, que les aimans doivent toutes leurs propriétés à des courans électriques tournant autour de leurs molécules comme ils tournent dans un solénoïde, et que la réunion de tous ces courans formant l'aimant agit comme un solénoïde qui aurait ses extrémités aux deux pôles de l'aimant. Cette théorie, que le fait général que nous venons de citer rend déjà très probable, acquiert toute la certitude dont sont susceptibles les théories physiques quand, en calculant d'après la formule par laquelle M. Ampère a représenté l'action de deux élémens de fils conducteurs, celle que doit exercer un solénoïde, soit sur un autre solénoïde, soit sur un élément de fil conducteur, on trouve précisément les mêmes lois que l'expérience a données à Coulomb pour l'action mutuelle de deux aimans, et à MM. Biot et Savart pour celle qu'un aimant et un élément de fil conducteur exercent l'un sur l'autre. Ces calculs ne pouvant trouver place ici, nous renvoyons le lecteur aux ouvrages de M. Ampère sur ce sujet, et particulièrement à celui qui a pour titre *Théorie mathématique des Phénomènes électro-dynamiques, uniquement déduite de l'expérience.*

493. Il y a deux manières d'expliquer l'aimantation par le courant voltaïque.

On peut supposer que dans les molécules du fer doux, les courans étant dirigés dans tous les sens, l'effet extérieur est nul. Dans cette hypothèse, le courant voltaïque ne ferait que donner à tous les courans moléculaires une direction commune : ou bien on peut supposer que les courans ne préexistent pas dans le fer, et que le courant voltaïque ou la présence d'un aimant leur donne naissance.

Pour savoir si cette seconde hypothèse est admissible, il faut voir si un courant voltaïque peut en produire d'autres. Pour cela, M. Ampère a suspendu un anneau de cuivre à un fil de soie (*fig.* 322), et l'a enveloppé d'une spirale semblable à celle de la *fig.* 340. Bientôt l'anneau a acquis la propriété d'être mis en mouvement par un aimant. Ainsi l'une ou l'autre hypothèse est admissible. M. Faraday a singulièrement agrandi le sujet des courans produits par influence.

494. 1re SÉRIE. — *Production d'un courant par un courant.* Si l'on dispose deux fils métalliques couverts de soie, autour d'un même support, de manière que les deux hélices résultantes soient en quelque sorte parallèles dans toutes leurs parties; si maintenant l'on joint les deux extrémités d'un des fils avec les extrémités d'une pile énergique et qu'on fasse communiquer les extrémités de l'autre fil avec un galvanomètre, on remarque 1° qu'un courant prend naissance dans le fil du galvanomètre, en sens contraire du courant générateur; 2° que le courant cesse aussitôt, puisque le galvanomètre reprend sa position primitive; 3° qu'un courant en sens contraire se manifeste dans le galvanomètre au moment où l'on détruit la communication entre le fil générateur et la pile.

Plusieurs autres expériences sont des conséquences de celle-ci. Si l'on substitue une hélice au galvanomètre, et qu'on y place un fil d'acier, il

serait aimanté dans un sens au moment où l'on établit la communication ; il n'y a pas d'aimantation si l'on place le fil et si on le retire pendant la durée du courant générateur ; enfin il est aimanté dans un sens contraire si l'on met le fil pendant l'existence du courant générateur, et si on le laisse jusqu'au moment de l'interruption.

2e SÉRIE. Si l'on *approche* ou si l'on *éloigne* un fil lié à un galvanomètre, d'un fil communiquant avec une pile en action, il s'y produit un courant en *sens contraire* ou dans le *sens* du second ; si le premier fil conserve une *position fixe*, aucun courant ne se manifeste.

La substitution d'un aimant au courant générateur de la pile donne naissance à des phénomènes analogues aux précédens ; par exemple, si l'on entoure l'armature en fer doux d'un fort aimant en forme de fer à cheval, avec un fil de cuivre couvert de soie et communiquant avec un galvanomètre, on trouve que l'application de l'armature contre l'aimant détermine une déviation dans le galvanomètre, en sens contraire de celle qu'y ferait naître le courant qui mettrait l'armature dans l'état où elle est amenée par l'aimant. Si l'on sépare l'armature de l'aimant, une déviation contraire se manifeste ; enfin, pendant le contact, le galvanomètre n'est pas influencé.

Les aimans doivent évidemment, d'après le dernier fait, agir sur les hélices. En effet, si l'on introduit un aimant dans l'intérieur d'une hélice dont les deux extrémités communiquent avec un galvanomètre, on remarque qu'en l'approchant brusquement, le galvanomètre éprouve une déviation. Si on l'éloigne, une déviation en sens contraire a lieu ; si l'on porte l'aimant jusqu'au milieu de l'hélice, il n'y pas de déviation ; enfin le galvanomètre éprouve une déviation inverse de la première quand l'aimant est retiré par l'extrémité opposée à celle par laquelle il a été introduit.

Dans tous les cas, le galvanomètre n'annonce pas de courant quand l'aimant est en repos. On conçoit que si l'on place un morceau de fer doux dans l'hélice, les effets manifestés à l'approche ou par l'éloignement de l'aimant seront plus grands ; c'est en effet ce qui a lieu. (*An. Ch. Phys.*, t. 50).

495. Un grand nombre de physiciens ont cherché sans succès à produire des étincelles par l'action des aimans. M. Faraday vient de réussir dans ses essais à ce sujet. La question est en quelque sorte résolue par ce qui précède, puisque les aimans déterminent des courans. Nous décrirons l'appareil imaginé par MM. Pixii père et fils pour ce sujet. Cet appareil assez simple permet de rendre manifestes tous les effets connus du courant voltaïque.

La fig. 23, p. 16, représente la partie principale de cet appareil.

M N P est un aimant énergique, mobile autour d'un axe vertical *P Q*. Les pôles *M* et *N* de cet aimant viennent passer successivement près des extrémités *A B*. Si l'on se rappelle les faits précédens, on voit qu'il doit s'établir à chaque passage de l'aimant au-dessous de l'armature *A C B* en fer doux deux courans opposés.

On pourra faire servir le fil *V R* à constater tous les effets des courans voltaïques, tels que la production des étincelles, la charge des instrumens condensateurs, la commotion, enfin la décomposition de l'eau. Le courant changeant à chaque demi-révolution de l'aimant, les deux élémens de l'eau se dégageraient successivement à l'extrémité du même fil. On peut, à l'aide d'une bascule convenablement disposée, avoir chaque gaz isolé.

Description d'un appareil à l'aide duquel toutes les expériences mentionnées dans les articles consacrés aux phénomènes électro-dynamiques peuvent être réalisées (1).

496. Pour réunir les avantages des appareils particuliers, il fallait rendre permanentes les parties de l'instrument destinées à effectuer les opérations communes à toutes les expériences, et ensuite mettre successivement en communication avec ces parties communes les divers conducteurs mobiles dont chacun se rattache isolément à l'appareil général. Tel est le but que M. Ampère s'est proposé d'atteindre dans l'instrument (*fig.* 330) dont nous donnons ici la description d'après lui.

Dans les expériences d'électricité dynamique, une portion du circuit voltaïque rendue mobile est soumise à l'action d'un conducteur fixe, d'un aimant ou de la terre. Pour que le circuit ne soit pas interrompu, cette partie mobile doit être réunie à l'ensemble des conducteurs par des coupes pleines de mercure, métal dont on se sert également pour réunir entre elles les parties de l'appareil que l'on ne peut lier ni souder invariablement. Il est bon que la table *g h* (*fig.* 330) qui porte l'appareil soit revêtue d'un vernis isolant ; et il faut éviter avec le plus grand soin d'y répandre de l'eau acidulée, et surtout se débarrasser du mercure qui y tombe dans le courant des expériences. Une ouverture pratiquée vers le milieu de la table, et communiquant avec un tiroir, est destinée à cet objet.

Il est important, dans toutes les expériences que nous allons décrire, d'avoir soin d'interrompre le courant électrique dans les conducteurs mobiles, toutes les fois qu'on veut plonger les pointes de ces conducteurs dans les coupes, ou les en retirer : cette précaution est indispensable pour éviter la combustion ou la fusion des pointes. Il est aussi nécessaire, avant de commencer ces expériences, de

(1) Les élèves peuvent se dispenser de lire cette description ; pour saisir le jeu de toutes les parties de l'appareil, il faut avoir cet appareil sous les yeux. Ce qui précède renferme d'ailleurs ce qu'il y a d'important à connaître sur les phénomènes électro-dynamiques.

s'assurer que le courant passe effectivement et par le conducteur fixe et par le conducteur mobile ; ce qu'on reconnaît aisément à l'aide du galvanomètre.

Quant aux suspensions, elles sont établies par le moyen de petites coupes remplies de mercure, disposées selon le besoin des expériences. Les deux fils de la pile sont fixés à la table à l'aide d'une vis de pression *p* pendant le cours des expériences, afin qu'on puisse faire plonger à volonté chacun d'eux, soit dans la rigole *A*, soit dans la rigole *a*. Le démonstrateur peut, par un mouvement prompt et facile, suspendre l'action électro-dynamique ou en changer le sens, en renversant la marche du courant, soit dans les conducteurs fixes, soit dans les conducteurs mobiles.

Supposons-le placé en avant de la table *g h* et tourné vers elle, il aura à sa droite les fils *R*, *r*, et devant lui, du même côté, deux bascules *K* et *k* destinées à changer la direction du courant des conducteurs fixes et des conducteurs mobiles. Ces bascules, élevées d'environ un pouce au-dessus de la table, sont formées chacune par deux plaques de cuivre, isolées par un morceau d'ivoire ou de bois verni. Sur les bords latéraux des deux plaques d'une bascule on remarque huit appendices, dont quatre situés à droite plongent, lorsque l'on incline de ce côté la bascule la plus rapprochée de l'opérateur, dans les rigoles *A*, *B*, et dans les deux cavités *C*, *D* (*fig.* 342); les quatre autres appendices, lorsque cette bascule est inclinée à gauche, plongent dans les mêmes rigoles *A*, *B*, et dans les cavités *C'*, *D'* ; mais en la maintenant dans une position horizontale, toute communication métallique est rompue entre *A* et *B* et les cavités *C*, *D* ou *C'* *D'*. Celles-ci communiquent deux à deux, c'est-à-dire *C* avec *C'*, et *D* avec *D'*, au moyen de lames de cuivre placées en sautoir sur la table, revêtues de soie et séparées l'une de l'autre par une pièce de bois verni. Les cavités *G* et *H* (*fig.* 330) répondent à des lames de cuivre qui aboutissent, l'une dans la cavité *C'*, et l'autre dans la cavité *D'* : elles sont donc aussi en communication, au moyen du sautoir, la première avec *C*, et la seconde avec *D*. La bascule *k* sert, suivant le sens dans lequel on l'incline, à établir ou à interrompre les communications entre les rigoles *B* et *a*, et les cavités *c*, *d*, ou *c'*, *d'*. Celles-ci, réunies par couples à l'aide d'un sautoir semblable au premier, sont disposées de manière que *c* et *c'* communiquent à l'aide de la lame de cuivre *c f s*, et du ressort *H'* placé sous la table, avec la coupe *S*, dont on règle la hauteur au moyen de la vis *s*, placée au-dessous de la table ; elles communiquent aussi avec la colonne *f u*. De leur côté *d* et *d'* communiquent d'abord avec deux rigoles semi-circulaires *M N*, *m n*, qui contiennent du mercure dans lequel plongent les deux extrémités du fil *t u v* d'une boussole, et, par suite, avec la colonne *F U* et avec la cavité *O*.

Les colonnes *f u*, *F U*, sont en cuivre et servent indistinctement, suivant la position de la bascule *k*, l'une à transporter le courant dans les conducteurs mobiles, et l'autre à le ramener (1). A cet effet, la colonne *F U* communique avec la coupe *X*, et *f u* avec la coupe *Y* isolée de la première par un tube de verre revêtu de gomme laque. *X* communique avec *x*, *x'* et *Y* avec *y* et *y'*. Chaque système de deux coupes *x* et *y* ou *x'* et *y'* fournit aux conducteurs mobiles une suspension verticale passant par le centre des coupes, et *x* avec *y'*, ou *x'* avec *y*, une suspension horizontale susceptible, par le moyen du bouton *Z*, d'être mise dans tous les azimuts.

Il est aisé de voir, d'après ces dispositions, que quand on a plongé les fils de la pile dans les rigoles *A* et *a*, le courant ne peut s'établir par les colonnes *f u*, *F U*, parce qu'en suivant la série des pièces métalliques par lesquelles les deux rigoles doivent communiquer, on trouve qu'elle est interrompue en deux endroits, d'abord entre les coupes dont nous venons de parler, ensuite entre les deux cavités *G*, *H*, pratiquées dans la table, et où l'on suppose aussi qu'on a mis du mercure. En plaçant, soit un des conducteurs mobiles des *fig.* 332, 333, dans les coupes *x*, *y* ou *x'* *y'*, soit le conducteur de la *fig.* 336, dans les coupes *x*, *y'* ou *x'* *y*, on établit la communication entre les deux colonnes, et le circuit voltaïque n'est plus interrompu qu'entre les deux cavités *G*, *H*. Si donc on veut observer l'action de la terre sur les conducteurs des *fig.* 343 et 345, les seuls sur lesquels elle puisse agir, puisque les autres sont astatiques, il faudra, après les avoir placés dans ces coupes, établir la communication entre les deux cavités *G*, *H* (*fig.* 330), ce qui se fait au moyen d'une pièce de cuivre *Q q*, tournant autour de la charnière *q*, attachée à la table, et dont les appendices *e*, *f*, sont disposés de manière à plonger, lorsqu'on la renverse, dans les cavités *G*, *H* ; dès que ces pointes sont en contact avec le mercure qu'elles contiennent, le circuit se trouve fermé, le courant s'établit, et l'action de la terre sur les conducteurs mobiles se manifeste aussitôt.

Mais quand on veut observer l'action d'un courant sur les divers conducteurs mobiles, on remet la pièce *Q q* dans la situation où elle est représentée (*fig.* 330) ; le courant est de nouveau inter-

(1) Dans les premiers appareils construits par M. Ampère, c'était la colonne *E T* qui ne doit servir que de support à la traverse *U T*, qui servait à établir la communication, laquelle, d'après ce que nous venons de dire, doit se faire par la colonne *f u*. Cette disposition était vicieuse en ce que l'action de la portion du courant établie dans *E T* s'ajoutait avec celle de la portion de courant de colonne *FU* pour altérer les mouvemens des conducteurs mobiles, au lieu que l'action du courant de *f u* détruit celle du courant de *FU* d'autant plus exactement que ces colonnes sont plus près l'une de l'autre. Il est aisé de corriger ce défaut dans les appareils où il se trouve.

rompu, mais on le rétablit en plaçant dans les cavités G, H, les extrémités marquées des mêmes lettres dans les *fig.* 331 et 337, des conducteurs fixes qui y sont présentés. Le premier se compose d'un pied horizontal $R\,S$, garni en dessous de quatre pointes L, L, L, L, qui se place dans quatre trous pratiqués dans la table de la *fig.* 330, où ils sont désignés par ces mêmes lettres. Au milieu de ce pied, s'élève une tige $K\,L$, qui est faite en bois comme lui, et qui soutient la tablette $P\,Q$. Sur ce pied est disposé un fil de cuivre à deux branches, dont les extrémités sont marquées $G\,H$, et $G'\,H'$. Quand ce sont les premières qui sont placées dans les cavités G, H (*fig.* 330), c'est la partie $p\,o$ de ce fil qui se trouve à droite et qui agit sur la partie $b\,c$ du conducteur mobile astatique de la *fig.* 333, suspendu aux coupes x et y de la *fig.* 330, pour l'attirer ou la repousser suivant que dans ces deux portions de fil conducteur, toutes deux verticales, le courant électrique va dans le même sens ou dans des directions opposées.

C'est aussi dans ces coupes que l'on place les extrémités x, y, des conducteurs mobiles représentés dans les *fig.* 349 et 350, pour montrer que le courant du fil $o\,p$ (*fig.* 337) est sans action sur ces conducteurs.

Quand ce sont les extrémités G' H' (*fig.* 337) qui plongent dans les cavités G, H (*fig.* 330), la portion $b\,c$ du conducteur mobile de la *fig.* 333, se trouve entre les deux portions de fil conducteur $m\,n$ et $v\,t$ du conducteur fixe de la *fig.* 337, dont l'un est rectiligne et l'autre sinueux; en sorte qu'ils attirent tous deux ou repoussent tous les deux avec des forces égales, le courant du fil $b\,c$ (*fig.* 333).

L'autre conducteur fixe (*fig.* 331) a un pied $R\,S$ semblable à celui du précédent et qui porte un cadre vertical en bois $P\,M\,N\,O$, sur le pourtour duquel se replie plusieurs fois, pour en rendre l'action plus intense, une lame de cuivre revêtue de soie, dont on voit les extrémités en G et en H; ces extrémités plongent également dans le mercure des cavités G, H (*fig.* 330), soit que l'on place les pointes L, L, L, L (*fig.* 331), du pied $R\,S$ dans les trous L, L, L, L (*fig.* 330) ou dans les trous L', L', L', L'. Dans le premier cas, le cadre $P\,M\,N\,O$ se trouve placé verticalement au-dessous de la traverse $T\,U$ (*fig.* 330). Dans le second, il est placé excentriquement d'une quantité égale aux rayons des arcs de la *fig.* 335, et du vase de la *fig.* 340.

C'est dans la première de ces deux positions que l'on met ce conducteur fixe lorsqu'on veut s'en servir à la place du précédent, pour l'expérience de l'action mutuelle des deux courans parallèles. Il faut alors employer le conducteur mobile de la *fig*, 336. Le contre-poids s sert à faire tenir le conducteur mobile en équilibre à côté et à une petite distance du conducteur fixe.

C'est aussi avec le conducteur (*fig.* 331) que l'on fait toutes les expériences relatives à l'action de deux courans angulaires que nous allons décrire.

Expériences sur l'action mutuelle de deux courans rectilignes formant un angle quelconque.

497. Si, après avoir placé le conducteur astatique (*fig.* 332) dans la situation où il répond verticalement à la tige $T\,U$, on met les deux pointes x et y de ce conducteur mobile dans les coupes x, y de la *fig.* 330, et que le point e se trouve tout près du point N (*fig.* 331), les courans rectilignes $d\,e$ (*fig.* 332) et $M\,N$ (*fig.* 331) formant un angle quelconque, on constate par le mouvement du conducteur mobile l'action attractive ou répulsive qu'ils exercent l'un sur l'autre.

Quand le même conducteur mobile est suspendu aux coupes x', y', le point e répond au milieu de la partie $M\,N$ du rectangle (*fig.* 331); il y a alors action dans deux angles de suite : dans l'une elle est attractive, dans l'autre répulsive; l'effet produit est le même que dans la disposition précédente, mais l'intensité est sensiblement doublée. La branche p ne sert que comme contre-poids.

Le conducteur mobile (*fig.* 333) peut être alternativement placé dans les coupes x et y ou x' et y'. Dans le premier cas, le courant, venant toujours par les coupes X et x, suit la route $x\,a\,b\,c\,d\,e\,f\,g\,h\,i\,y$: dès lors, dans les fils, $c\,d$ et $g\,h$, ce courant est encore dirigé vers le sommet de l'angle que ces deux fils forment avec le conducteur fixe; c'est pourquoi, si l'on place le conducteur mobile dans un plan perpendiculaire à celui du rectangle fixe, et de manière que les points $d\,h$ soient très près de l'extrémité N (*fig.* 331), les deux portions $c\,d$ et $h\,g$ seront toutes deux attirées ou toutes deux repoussées, suivant le sens du courant du conducteur fixe. Dans le cas où il y a attraction, il en résulte un équilibre non stable; car si l'un de ces fils est accidentellement un peu plus rapproché que l'autre du conducteur fixe, il en sera plus fortement attiré et se portera vers lui. Si l'on change la direction du courant, dans l'un ou dans l'autre conducteur, l'attraction sera changée en répulsion, et le conducteur mobile se placera perpendiculairement au conducteur fixe. Ici l'équilibre sera stable.

Lorsqu'on suspend le même conducteur dans les coupes x', y', les points $d\,h$ répondent au milieu O de $M\,N$, et comme le courant suit une direction opposée à la précédente, et parcourt le conducteur mobile dans la direction $y\,i\,h\,g\,f\,e\,d\,c\,b\,a\,x$, il s'éloigne, dans les fils $c\,d$ et $g\,h$, de la partie moyenne $d\,h$, en sorte que ces deux fils sont portés avec des forces égales dans le sens du courant du rectangle, ce qui tend à incliner un peu dans ce sens le conducteur mobile, mais ne lui imprime aucun mouvement de rotation.

Le conducteur (*fig.* 334) suspendu dans les coupes x', y', livre passage au fluide électrique dans le sens $x'\,a\,b\,c\,d\,e\,f\,g\,h\,i\,y'$; si donc il coupe d'abord sous un angle quelconque le conducteur fixe $M\,N$

(*fig.* 331), et que dans l'un et l'autre conducteur le courant soit dirigé dans le même sens, il tendra à se mouvoir jusqu'à ce que la branche *d e* soit parallèle à *M N*. Aussi verra-t-on le conducteur mobile faire une demi-révolution si l'on change la direction de l'un des courans.

L'appareil (*fig.* 335) est destiné à faire voir que dans le conducteur (*fig.* 334) les branches *c d*, *e f*, contribuent à l'effet produit, car il n'y a que les fils désignés par les mêmes lettres dans la *fig.* 335, qui, pouvant recevoir quelque mouvement de la part du conducteur fixe, contribuent à faire mouvoir le conducteur mobile; les actions de ce conducteur sur chacun des élémens des cercles horizontaux du conducteur mobile, passant par l'axe de rotation, ne peuvent en rien contribuer au mouvement de ce dernier; on voit cependant le mouvement se produire encore, à la vérité avec une force beaucoup moindre. Le même conducteur mobile (*fig.* 335) sert, en outre, ainsi que celui de la *fig.* 340 *bis*, pour les expériences relatives à l'action mutuelle de deux courans dont les directions forment constamment un angle droit.

Expériences relatives à la rotation continue déterminée par un conducteur fixe, par l'action de la terre, ou par celle des courans qui s'établissent dans l'eau acidulée où plongent les conducteurs mobiles.

498. Pour toutes les expériences de rotation continue, on place les trois points *O*, *l*, *l* du trépied (*fig.* 340) dans la cavité et les trous désignés par les mêmes lettres sur la table (*fig.* 330); alors on pose sur ce trépied le vase de cuivre (*fig.* 339), dont le pied *J I* vient plonger dans la cavité *I* (*fig.* 340) qui communique par la lame de cuivre *I O* avec la cavité *O* (*fig.* 330). Ce vase est ensuite rempli d'eau acidulée, dans laquelle plonge la partie inférieure de tous les conducteurs mobiles destinés à ce genre d'expériences. Le courant ne passe plus alors dans les deux colonnes *f u*, *F U*, qui ne lui présentent aucune issue, parce qu'on a eu la précaution d'ôter les conducteurs mobiles : ainsi après avoir parcouru le conducteur fixe, il arrive dans la rigole *B*, passe dans la cavité *c'*, en supposant la bascule *k* inclinée à droite, se rend dans la coupe *S*, parcourt le conducteur mobile qui y est suspendu, traverse l'eau acidulée du vase, le vase lui-même, et se rend au fil négatif par *O o c*. Dans l'appareil qui vient d'être décrit, le mouvement est produit par l'action d'une spirale placée sur le bord du trépied, de manière à entourer le vase; on fait descendre le long de deux autres pieds du trépied les deux extrémités de la lame de cuivre qui forme la spirale, et on les fait plonger, l'une dans *G*, et l'autre dans *H*. Quand le mouvement doit être produit par un courant rectiligne tangent au vase, on emploie le rectangle *fig.* 331; et l'on a soin de relever les extrémités *G* et *H* (*fig.* 340) de la spirale, de manière qu'elles ne plongent plus dans les cavités correspondantes *G H* (*fig.* 330) : dans ce cas, ce sont les appendices *G*, *H*, du rectangle, *fig.* 331, qu'il faut y faire plonger, en retournant ce rectangle et en plaçant les pointes *L*, *L*, *L*, *L*, dans les trous *L'*, *L'*, *L'*, *L'*, (*fig.* 330).

Il a déjà été question des conducteurs (*fig.* 340, *bis*, 341, 348, 295) qui servent dans ces expériences.

En faisant agir sur les deux appareils, *fig.* 340 *bis*, et 341, le courant spiral de la *fig.* 340, ils tournent tous deux d'un mouvement de rotation continu, dont la vitesse, d'abord accélérée, devient ensuite constante; mais en soumettant les deux conducteurs à l'action du courant du rectangle *fig.* 331, l'appareil *fig.* 341 tournera encore d'un mouvement de rotation continu, dont la vitesse ne devient jamais uniforme, mais éprouve des variations alternatives, suivant que le rayon *a c* se trouve, à chaque révolution, tantôt plus près, tantôt plus loin du rectangle. Quant à l'appareil de la *fig.* 340 *bis*, il ne tendra plus à tourner que par l'action de la terre, et celle du rectangle *fig.* 331 tendra à l'amener dans une situation fixe, où le plan *a b c d* sera toujours parallèle au plan de ce rectangle, de manière que la branche *a b* soit du côté d'où vient le courant établi dans *M N* lorsque celui de *a b* est descendant, et du côté opposé quand ce dernier est ascendant. Enfin, en soumettant à la seule action de la terre l'appareil *fig.* 341, on le voit tourner avec une vitesse constante; mais il n'en est pas de même de l'appareil *fig.* 340 *bis*, parce que, outre l'action que la terre exerce sur la branche *b s* pour la faire tourner uniformément, elle agit aussi sur la branche verticale *a b* pour l'amener dans une position fixe, à l'est quand ce courant est descendant, et à l'ouest quand il est ascendant.

Il est essentiel de remarquer que lorsqu'on veut laisser agir la terre ou les courans de l'eau acidulée, il faut faire communiquer les rigoles *A B*, (*fig.* 330) par le conducteur *q Q*; alors le courant parcourt les conducteurs mobiles, soit en passant par les deux colonnes *f u* et *F U*, soit en se rendant dans la coupe *S*, suivant que les conducteurs mobiles sont suspendus dans les coupes *x*, *y*, *s'*, *y'*, ou dans la coupe *S*.

Expériences relatives aux hélices ou solénoïdes.

499. Les *fig.* 346 et 347 représentent des conducteurs en hélices avec lesquels on peut imiter les aimans : le premier se fixe à la table *fig.* 330, au moyen de la pince *b*, de manière que ses deux appendices *G* et *H* plongent dans les cavités de même nom; le second (*fig.* 346) est suspendu dans

les coupes $x y$, $x' y'$; le courant s'établit donc dans celui de la *fig.* 346 comme il le ferait dans un autre conducteur fixe, et dans celui de la *fig.* 347 comme il s'établirait dans un autre conducteur mobile ; on vérifie sur ces hélices les propositions démontrées ci-avant.

Du Multiplicateur.

500. M. Schweiger, de Halle, a imaginé un appareil propre à mettre en évidence l'existence des plus faibles courans électriques. La construction de cet instrument est fondée sur l'égalité d'action de toutes les parties d'un fil conducteur, et sur ce qu'un fil replié une fois sur lui-même produit un effet double de celui que produit un fil simple (*fig.* 325) n° 435 : replié deux fois, il produit un effet quadruple, enfin l'effet est proportionnel au nombre des circonvolutions du fil. D'après cela, on peut augmenter indéfiniment la puissance du multiplicateur.

La *fig.* 324 représente cet appareil : *A A* est le pied de l'instrument; *C C*, *C' C'*, sont deux montans qui portent un châssis *B B*, dans le bord duquel existe une rainure où se logent les tours successifs du fil multiplicateur. *D D* est un montant destiné à porter le fil auquel l'aimant doit être suspendu. Toutes ces parties sont en bois. *E* est un fil de métal qui passe à frottement par un trou pratiqué dans la partie supérieure du montant *D D*. A ce fil métallique s'attache par un peu de cire le fil de cocon *E F*, qui porte à son extrémité l'aiguille aimantée. Le fil de suspension passe à travers un cylindre, ce qui empêche le fil multiplicateur de le toucher.

On voit encore, au-dessous de l'aiguille aimantée, un cercle *R* divisé, sur lequel se mesurent les déviations. Le fil multiplicateur est en cuivre ou en argent et d'un quart de millimètre environ de diamètre. *Il est enveloppé de soie dans toute sa longueur;* on empêche ainsi toute communication entre les différentes parties de ce fil qui sont superposées dans la rainure du châssis *B B*. *H* et *J* représentent les deux extrémités du fil.

L'usage de cet appareil se conçoit presque sans explication. Pour multiplier l'action qu'a sur l'aiguille un courant galvanique, on n'a qu'à établir les communications de manière que le fil multiplicateur devienne une partie du circuit. La force directrice de la terre tend toujours à ramener l'aiguille dans le méridien magnétique, n° 404. En sorte que pour donner à l'instrument toute la sensibilité dont il est susceptible, il faut diminuer cette force, sans toutefois la détruire, parce que dans le dernier cas les courans les plus faibles amèneraient l'aiguille dans la même position que les courans les plus énergiques. On affaiblit la force directrice de la terre en suspendant deux aiguilles à pôles opposés, l'une dans le circuit des fils, l'autre en dehors. Cet instrument est aujourd'hui bien précieux.

Des Poissons électriques.

501. Plusieurs poissons ont la faculté de produire des effets tout-à-fait analogues à ceux des décharges électriques. On en connaît aujourd'hui plusieurs espèces (1).

Le gymnote et la torpille sont les deux espèces sur lesquelles il a été fait le plus de recherches.

De ce que ces animaux sont pouvus d'un organe formé de cellules disposées de la même manière que les plaques métalliques dans une pile, on a considéré cet organe comme la source de leur puissance électrique.

Les effets des poissons électriques sont incontestables : nous citerons ceux dont M. de Humboldt a été témoin. Consacré, pendant son séjour dans l'Inde, à enrichir toutes les parties de l'histoire naturelle, il a fait aussi quelques essais sur les gymnotes. Ayant fait mettre des chevaux sauvages dans un ruisseau qui contenait beaucoup de ces poissons, il a vu ceux-ci nageant à la surface de l'eau, se presser sous le ventre des chevaux, et les faire succomber par la violence des coups invisibles qu'ils leur portaient.

« On ne s'expose pas impunément, dit M. de Humboldt, aux premières commotions d'un gymnote très grand et fortement irrité. Si, par hasard, on reçoit un coup avant que le poisson soit blessé ou fatigué, la douleur et l'engourdissement sont si violens, qu'il est impossible de prononcer sur la nature du sentiment que l'on éprouve. Je ne me souviens pas d'avoir jamais reçu, par la décharge d'une grande bouteille de Leyde, une commotion plus effrayante que celle que j'ai ressentie en plaçant imprudemment les deux pieds sur un gymnote qu'on venait de retirer de l'eau. Je fus affecté le reste du jour d'une vive douleur dans les genoux et presque dans toutes les jointures. »

D'après ce qui précède, on ne sera pas étonné si l'on a employé jadis le gymnote pour la guérison des paralytiques.

502. L'action électrique du gymnote dépend uniquement de sa volonté. On tente souvent, isolé ou non isolé, de toucher le poisson, sans éprouver la moindre commotion ; il dépend même de l'animal de n'agir que vers le point dans lequel il se croit le plus fortement irrité.

L'action du poisson sur les organes de l'homme est transmise ou interceptée par les mêmes corps qui transmettent ou interceptent le courant électrique.

On n'a jamais vu la plus petite étincelle sortir de l'animal ; irrité dans l'obscurité, il ne répand pas la plus faible lumière, comme MM. de Humboldt et Bonpland l'ont constaté.

(1) Voyez *Ann. du Muséum d'Hist. nat.*, 5e cahier, un travail dans lequel M. Geoffroy-Saint-Hilaire considère tous les poissons électriques comme appartenant à des genres différens.

Walsh est parvenu à faire éprouver la commotion à vingt personnes non isolées, qui se tenaient par la main, et dont les deux placées aux extrémités touchaient, l'une le ventre, l'autre le dos de l'animal.

MM. de Blainville et Fleuriau de Bellevue ont constaté récemment que lorsqu'on plonge dans l'organe électrique de cet animal les extrémités du fil du multiplicateur, l'aiguille est déviée d'une quantité considérable. Le docteur Davy a aimanté des aiguilles d'acier.

Ainsi, tous les effets que produit la pile, la torpille les produit.

Nous ajouterons encore ici un fait observé par M. Gay-Lussac, et qui est bien singulier, s'il ne tient pas à la faiblesse de l'animal ; c'est que lorsqu'une personne isolée touche une torpille, il faut que le contact soit immédiat pour qu'elle éprouve une commotion : ainsi on la touche impunément avec une clef.

DE L'OPTIQUE.

503. L'optique est une des branches les plus importantes de la physique; elle fournit à l'astronomie, à la navigation et à l'histoire naturelle, des instrumens précieux sans lesquels ces sciences, si riches en faits, seraient encore dans l'enfance. La connaissance des propriétés de la lumière permet d'expliquer un grand nombre de phénomènes naturels souvent reproduits : par exemple, l'arc-en-ciel, le crépuscule, l'aberration des étoiles, etc. Avant d'entrer dans les détails de la théorie et de la construction des instrumens d'optique, avant de chercher à expliquer les phénomènes dans lesquels la lumière joue le principal rôle, nous en indiquerons les propriétés les plus remarquables.

PROPRIÉTÉS DE LA LUMIÈRE.

1° *Transmission*. La transmission de la lumière se fait en ligne droite; pour le démontrer d'une manière expérimentale, pratiquez une petite ouverture au volet d'une chambre obscure; la lumière en pénétrant dans la chambre éclairera tous les corps qui seront sur son passage et donnera naissance à une trace brillante rectiligne. Tout le monde sait que lorsque sur la ligne droite qui joint l'œil et un objet on place un corps opaque, l'objet cesse d'être aperçu.

2° *Vitesse*. La vitesse de la lumière est prodigieuse. Galilée est le premier qui ait cherché à la mesurer; mais ses recherches furent sans succès, parce qu'il faisait parcourir à la lumière un intervalle trop peu étendu. Les observations astronomiques offrent des moyens de mesurer cette vitesse avec une grande précision. La première application en fut faite par Roemer et Cassini dans le mouvement du premier satellite de Jupiter. Cette planète est accompagnée de quatre satellites; elle projette dans l'espace une ombre cônique, dont la base repose sur sa partie éclairée; le premier satellite s'éclipse par son entrée dans le cône d'ombre : si un observateur est placé sur la terre entre Jupiter et le soleil, il reconnaît qu'il s'écoule 42 h. 1/2 entre deux éclipses successives; mais comme le mouvement de la terre autour du soleil est beaucoup plus rapide que celui de Jupiter, bientôt le soleil, la terre et Jupiter ne sont plus en ligne droite.

Dans une position très éloignée de la première, l'observateur devrait voir sortir le satellite du cône d'ombre, au bout d'un certain nombre de fois 42 h. 1/2, si la vitesse de la lumière était infinie; mais il n'en est pas ainsi, le satellite est d'autant plus en retard que l'augmentation de la distance est devenue plus grande. Si la terre est à l'extrémité du diamètre de son orbite, le retard est de 16′ 26″. Ce diamètre est de 68 à 69 millions de lieues; la lumière a donc une vitesse de 70,000 lieues par seconde; elle nous vient conséquemment du soleil en 8′ 13″. Cette vitesse immense a été trouvée la même pour les autres satellites. Elle est 10 mille fois plus grande que la vitesse de translation de la terre, 6 millions de fois plus que celle d'un boulet de canon.

Cette vitesse est constante; c'est-à-dire que, quelle que soit la distance de la terre à Jupiter, on trouve toujours 70,000 lieues pour l'espace parcouru dans une seconde.

3° *Ombre*. Quand un corps opaque est en présence d'un corps lumineux, il ne peut jamais être éclairé en totalité; l'ombre est modifiée par les dimensions, la forme, la position du corps lumineux et du corps opaque. L'on donne le nom d'*ombre pure* à la portion de l'espace privée de lumière.

Le passage entre la partie obscure et la partie parfaitement éclairée ne se fait pas d'une manière tranchée. La portion de l'espace qui ne reçoit qu'une partie de la lumière est appelée *pénombre*.

4° *Décroissement de l'intensité*. L'intensité de la lumière décroît comme le carré de la distance : on le démontre comme pour la chaleur, n° 96.

5° *Influence de l'inclinaison de la surface*. L'intensité de la lumière dépend encore de l'inclinaison de la surface par rapport à la direction des rayons. Ainsi les surfaces $B\,E$ et $C\,B$ (*fig.* 358) seront vues du point H avec la même intensité de lumière; la ligne $B\,C$ étant à la ligne $B\,E$ comme 1 est à sin. $B\,C\,E$, il faut que l'intensité de la lumière lancée par $B\,C$ dans la direction $C\,L$ ou $D\,H$ soit dans un rapport inverse, puisque les deux surfaces $B\,E$ et $B\,C$, vues dans cette direction, sont également lumi-

neuses. De même, si l'on reçoit la lumière d'un corps *A B* (*fig.* 359) successivement sur les surfaces *C D* et *D E*, l'intensité de la lumière sur *C D* sera évidemment à celle sur *D E*, en raison inverse de ces surfaces. Il est donc démontré que l'intensité de la lumière émise ou reçue par une surface dans une direction donnée est proportionnelle au sinus de l'angle formé par cette surface avec la direction des rayons.

Il résulte des nos 4° et 5° qu'un point, placé au sommet d'un cône, reçoit la même quantité de lumière d'un corps lumineux qui embrasse l'ouverture du cône, quelle que soit la position de ce corps. Une proposition analogue a été déjà démontrée pour la chaleur.

6° *Passage à travers les milieux diaphanes.* Outre ces deux causes d'affaiblissement dans l'intensité de la lumière (4° et 5°), il en existe une troisième, qui est le passage à travers les milieux diaphanes. Ainsi la lumière des objets vus à une grande distance dans l'air, est peu vive. On conçoit d'après cela pourquoi le nombre des étoiles visibles à l'œil nu sur le sommet des hautes montagnes, est beaucoup plus grand que dans la plaine (1). L'effet de l'absorption se fait beaucoup plus sentir dans les milieux solides ou liquides. Le cristal le plus pur paraît opaque si on le prend sous une épaisseur de quelques pouces. Le fond des mers profondes est complètement privé de lumière (2).

Il n'est pas dans la nature de corps entièrement transparent.

7° *Sources de la lumière.* Le soleil et les étoiles sont lumineux par eux-mêmes; les autres corps ne le sont que par la lumière qu'ils reçoivent du soleil, ou parce qu'ils sont portés à une température élevée; tous les corps en général peuvent devenir lumineux, et conséquemment visibles dans l'obscurité, quand ils sont chauffés jusqu'à 500° environ.

504. La lumière, soit qu'elle se réfléchisse à la surface des corps, soit qu'elle pénètre dans leur intérieur, ou qu'elle passe seulement dans leur proximité, subit des modifications que nous examinerons aux articles *Réflexion*, *Réfraction*, *Dispersion*, *Diffration*.

505. Les physiciens ont imaginé deux hypothèses pour expliquer les phénomènes lumineux.

Les uns supposent, avec Newton, que les corps lumineux émettent dans tous les sens des particules d'une ténuité extrême, et jouissant de toutes les propriétés générales qui viennent d'être énoncées.

Les autres admettent l'hypothèse de Descartes, d'après laquelle l'impression d'un corps lumineux se transmet à l'œil par une suite d'ondulations, déterminées dans l'*éther*, fluide répandu dans tout l'univers. Nous reviendrons sur ce sujet à la fin de l'Optique; en attendant, nous ferons l'histoire des principaux phénomènes que nous avons à considérer en partant des propriétés de la lumière indiquées par l'expérience.

Réflexion de la lumière (1).

506. On dit qu'un rayon de lumière se réfléchit, quand après la rencontre d'une surface, il se replie vers le milieu qu'il avait déjà traversé. On appelle angle d'incidence l'angle formé par la première direction du rayon lumineux avec la surface, et angle de réflexion celui que forme le rayon réfléchi avec la même surface : l'expérience prouve que ces *deux angles sont égaux* et *placés dans un même plan perpendiculaire à la surface de réflexion*. Parmi les différentes manières de constater la vérité de cette proposition, la suivante est la plus simple.

Soit *A B C O* (*fig.* 351) un cercle gradué; *S O* un rayon de lumière, tombant sur le plan *A O B* d'un miroir, le cercle étant perpendiculaire à ce plan et le rayon *S O* étant parallèle au cercle; soit *O H* le rayon réfléchi; si l'on dispose au point *O* et dans le plan du rayon incident un tuyau d'un petit diamètre et revêtu de noir de fumée dans son intérieur (le noir a pour objet d'éteindre toute la lumière qui tomberait sur les parois intérieures et qui s'écarterait de l'axe du tuyau), on reconnaîtra qu'il n'est possible de voir le point lumineux *S*, que dans le cas où le tuyau *O H* placé dans le plan *S O C* fait un angle *H O B* égal à l'angle *S O A*.

L'égalité des angles *S O C* et *H O C* est une conséquence de celle des angles *S O A* et *H O B*, dont ils sont les complémens. Souvent on substitue ces derniers aux premiers. La connaissance de l'égalité des angles d'incidence et de réflexion nous permettra d'exposer les différentes circonstances présentées par la réflexion de la lumière sur le miroir plan et sur les miroirs courbes.

Une certaine quantité de lumière est absorbée par le miroir (2); mais, quelle que soit la perte, le faisceau réfléchi suit toujours la loi qui vient d'être démontrée.

On emploie deux espèces de miroirs, les miroirs métalliques et les glaces étamées.

(1) D'après Bouguer, un intervalle de 3 lieues 1/4 diminue d'un tiers l'intensité d'une lumière.

(2) L'intensité de la lumière décroît en progression géométrique par son passage à travers un milieu d'une densité uniforme et dont l'épaisseur croît en proportion arithmétique. (*Voyez* Bouguer et Lacaille.) Cette loi suppose que le faisceau lumineux perd la même proportion de son intensité, par son passage à travers une tranche d'égale épaisseur. Ainsi un faisceau d'une intensité représentée par 1000 perd 100 ou 1/10 dans une tranche *H*.

(1) *Voyez*, à la fin de l'ouvrage, les explications de la réflexion, dans la théorie de l'émission et dans celle des ondes.

(2) Quoiqu'on ait élevé des doutes sur l'exactitude des tables de Bouguer, elles suffisent pour donner une

507. *Miroir plan.* Un point lumineux R (*fig.* 352), placé devant un miroir AB, enverra des rayons dans toutes les directions; parmi ces rayons, quelques-uns, après la réflexion en $a\ b$, entreront dans l'œil d'un observateur placé en $p\ l$; l'ensemble de ces derniers rayons peut être considéré comme un cône tronqué, dont le cercle $p\ l$ forme la grande base, et dont la petite base repose sur le miroir. Comme le miroir plan a changé la direction du faisceau sans altérer la disposition relative des différens rayons qui le composent, le cône $l\,p\,R'$ sera égal au cône brisé $l\ p\ R$; l'observateur, ayant l'habitude de trouver les objets dans la direction des rayons lumineux qu'il reçoit dans l'œil, croira voir l'objet en R', les deux triangles $R\,D\,a$ et $R'\,D\,a$, ayant un angle égal compris entre des côtés égaux. $D\,R'$ est donc égal à $D\ R$. Ainsi l'objet est vu derrière le miroir à une distance $D\,R'$ égale à la distance $D\,R$.

On aura l'image d'un objet $F\,K$, d'une dimension donnée, en menant de chaque point de cet objet une perpendiculaire au miroir, et en la prolongeant au delà du miroir (*fig.* 353) d'une quantité égale à elle-même.

On peut remarquer que les objets sont vus dans le miroir plan avec la même forme et la même grandeur; seulement l'image est moins brillante que l'objet.

Si l'on déplace l'objet, on voit l'image se déplacer en sens opposé de la même quantité; si c'est au contraire le miroir qui se meut, le mouvement de l'image est double; ces effets sont une conséquence de ce que l'image et l'objet sont également distans du miroir. Voilà pourquoi un objet vertical placé devant un miroir paraît horizontal si le miroir prend l'inclinaison de 45°.

508. *Miroirs courbes.* On n'emploie en général que des miroirs de forme sphérique, parce que le travail des autres miroirs présente trop de difficultés. Une surface courbe étant un assemblage de une infinité de surfaces planes, les considérations précédentes auxquelles a donné lieu le miroir plan, sont applicables aux miroirs concaves ou convexes.

Supposons d'abord un simple rayon lumineux $m\ O$ (*fig.* 354) parallèle à l'axe $A\,C$ et tombant en m sur le miroir sphérique, il se réfléchira sur le petit élément de la surface sphérique comme sur un plan, en faisant l'angle de réflexion $F\,m\,C$ égal à l'angle d'incidence $C\,m\ O$ et en restant dans le plan de la normale $C\ m$ et du rayon incident. Pour trouver le point F d'intersection du rayon réfléchi et de l'axe, il faudra remarquer que les angles $F\,m\ C$ et $C\,m\ O$ sont égaux (n° 506); que les deux angles $F\,C\,m$ et $C\,m\,O$ sont alternes internes : les angles m et C du triangle $m\ C\ F$ sont donc aussi égaux; $F\,m$ est donc égal à $F\ C$. Mais comme l'arc $A\ m$ est toujours une très petite portion du cercle, les lignes $A\ F$ et $F\,m$ approchent beaucoup de l'égalité; le point F est donc à peu près sur le milieu du rayon $A\ C$. Ce que nous avons dit d'un seul rayon, et d'une seule section du miroir, pourrait être répété pour tout autre faisceau lumineux, et pour toute la surface du miroir; le point F, lieu de la réunion de tous les rayons parallèles à l'axe $A\ C$, est appelé *foyer principal* (1), et $A\ F$, la distance *focale principale*.

509. Supposons le point lumineux placé en P, sur l'axe au delà du centre. L'inspection de la *fig.* 355 montre que l'angle d'incidence $P\ m\ C$ est plus petit que dans le cas du parallélisme; l'angle de réflexion sera aussi plus petit; *le foyer conjugué* P' sera donc entre le foyer principal et le centre. La comparaison de la valeur de l'angle d'incidence dans le triangle $P\ m\ C$ et de l'angle de réflexion dans le triangle $P'\ m\ C$ conduit à $2\,A'\ C\ m = A'\,P'\,m + C\,P\,m$. Substituant à ces angles, toujours très petits, leurs tangentes, on a

$$\frac{2\,A'\,m}{A'\,C} = \frac{A'\,m}{A'\,P'} + \frac{A'\,m}{A'\,P},$$ ou bien, $A\,A'$ étant sensiblement nul, vu la petitesse de l'arc $A\,m$, $\frac{2'\,A'\,m}{AC}$ $= \frac{A'\,m}{AP'} + \frac{A'\,m}{AP}$ enfin $\frac{2}{AC} = \frac{1}{AP'} + \frac{1}{PA}$, relation

idée du phénomène. La table suivante indique la quantité de lumière réfléchie sous différens angles. On suppose 1000 rayons incidens.

Angles d'incidence.	Rayons réfléchis.	
	Eau	Verre.
5°	501	549
10	333	412
15	211	299
50	22	34
70	18	25
90	18	25
	Mercure et miroir de métal poli.	
11° 1/2	754	

Lambert avait reconnu, en exposant une lame diaphane à faces parallèles à l'action de la lumière (*fig.* 360), que la seconde face réfléchit sous le même angle plus de lumière que la première. M. Arago a vu depuis que les sinus des angles sous lesquels la première et la deuxième face réfléchissent la même proportion de lumière, sont comme les sinus des angles d'incidence et de réfraction. Ainsi supposons qu'un rayon de lumière JS tombant sur la première face CD, il se réfléchisse 1/10, par exemple, de toute la lumière incidente; il se réfléchirait aussi 1/10 du rayon réfracté, qui tombe sur la deuxième face AB, s'il n'était pas modifié par la polarisation. (*Voyez* la Polarisation.) M. Poisson a démontré que ce résultat est une conséquence de la théorie des ondes.

(1) Ce foyer n'est pas un point unique. Un rayon $o'\ m'$ plus éloigné de l'axe ferait un plus petit angle avec la surface du miroir, et irait après sa réflexion couper l'axe en un point F'. Les divers foyers sont d'autant plus rapprochés, que le miroir est une portion plus petite de la sphère à laquelle il appartenait. (*Voyez* plus loin les caustiques).

qui fera connaître la position du foyer conjugué P', quand le rayon $A\,C$ de la sphère et la distance $A\,P$ du point lumineux au miroir seront donnés. Si dans cette formule on supposait $A\,P$ infini, on retomberait sur la valeur de la distance focale principale, que nous avons déterminée directement.

Si le point lumineux était en P', le même calcul donnerait la valeur de $A\,P$. On voit aussi que si la lumière partait du centre, elle y serait renvoyée par la réflexion.

510. Pour que nous ayons examiné tous les cas, il ne reste qu'à placer ce point lumineux entre le miroir et le foyer principal (*fig.* 356). L'angle d'incidence $P\,m\,C$ est plus grand que l'angle $F\,m\,C$; or, un rayon incident $F\,m$ donnerait un rayon parallèle à l'axe : donc le rayon réfléchi $m\,D$, correspondant au rayon incident $P\,m$, doit donner un rayon divergent qui ne coupera l'axe que par son prolongement $m\,P'$ dans un sens opposé à celui de sa direction. Un calcul tout-à-fait semblable à celui du n° 507, appliqué aux angles d'incidence $P\,m\,C$ et de réflexion $C\,m\,D$ (la valeur du premier étant prise dans le triangle $P\,m\,C$, et celle du second dans le triangle $C\,m\,P'$), conduirait à la relation

$$\frac{2}{AC}=\frac{1}{AP}-\frac{1}{AP'}$$

Il est visible qu'on obtiendrait la même chose si le point lumineux était en P'.

Cette relation est celle du numéro 509, au signe près de $A\,P'$; d'où il faut conclure que la formule $\frac{2}{AC}=\frac{1}{AP}+\frac{1}{AP'}$ convient aux miroirs concaves et aux miroirs convexes, pourvu qu'on donne le signe *plus* aux lignes $A\,P$ et $A\,P'$ dans la concavité, et le signe *moins* dans la convexité. On représente ordinairement les lignes AC, AP, et AP' par r, p, p', en sorte que la formule générale s'écrit $\frac{2}{r}=\frac{1}{p}+\frac{1}{p'}$; sous cette forme elle est plus facile à retenir.

511. Si le point était placé hors de l'axe (*fig.* 366), on en trouverait le foyer conjugué en menant une ligne $P\,C$ par le centre, qui deviendrait l'axe par rapport au point P, et tout rentrerait dans le n° 509, parce qu'on n'aurait à faire sur l'axe $P\,C\,D$ que ce qui a été fait quand le point était sur l'axe $C\,A$.

512. Rien n'est plus facile que d'avoir l'image d'un objet; il suffit de répéter pour chaque point de cet objet la construction précédente (*fig.* 362); l'image est renversée. La similitude des triangles $H'\,P'\,C$ et $P\,H\,C$ donne la proportion $P'\,H' : P\,H :: P'\,C : P\,C$, d'où l'on déduit la grandeur de l'image $P'\,H'$. L'inspection de la figure montre que l'image d'un objet placé au delà du centre est plus petite que cet objet; que c'est le contraire pour un objet placé entre le foyer principal et le centre. La circonstance du renversement peut donner lieu à une expérience fort jolie. On place en $P'\,H'$ un bouquet renversé, qu'on a soin de cacher; l'image, agrandie et redressée par la réflexion, est vue en $P\,H$ par un spectateur convenablement placé. Je dis *convenablement placé*, car la *fig.* 362, dans laquelle sont tracés deux rayons partis du point P' de l'objet, montre que l'œil doit se trouver dans la direction des rayons lumineux, dont la réunion se fait en $P\,H$, et, vu la grandeur de la pupille, il peut embrasser l'ensemble des faisceaux qui forment l'image totale.

513. *Applications numériques. — Miroirs concaves.*—Supposons que le rayon du miroir (*fig.* 362) soit de $0^m,75$, que la grandeur de la ligne $P\,H$ soit de $0^m,05$, et que sa distance soit de 3 mètres; on demande la position et la grandeur de l'image $P'\,H'$.

Cette image est évidemment renversée; la position s'en détermine par le n° 509 en mettant dans la relation

$$\frac{2}{AC}=\frac{1}{AP}+\frac{1}{AP}.$$

Pour $A\,C$ sa valeur $0^m,75$ et pour $A\,P$ sa valeur $3^m,00$. On trouve $A\,P'=0^m,428$.

La grandeur sera fournie par la proportion du n° 512, qui est $P'\,H' : P\,H :: P'\,C : P\,C$.

Dans cette proportion tout est connu, excepté $P'\,H'$, grandeur de l'image. $P\,H=0^m,05$; $P\,C=A\,C-A\,P'=0^m,75-0^m,428=0^m,322$; $C\,P=A\,P-A\,C=3^m,00-0^m,75=2^m,25$, d'où $P'\,H'=0^m,007$.

Ainsi la grandeur de l'image est de 7 millimètres, tandis que celle de l'objet était de $0^m,05$ ou de 50 millimètres.

Par un calcul entièrement semblable on trouverait qu'un objet de 35 millimètres, placé à $0^m,45$ de distance du même miroir, donnerait une image de $0^m,175$ ou 175 millimètres placée à $2^m,25$.

514. *Autre application. — Miroir convexe.* — Un objet de $0^m,05$ est placé à 3 mètres de distance d'un miroir convexe dont le rayon est $0^m,75$. On demande la position et la grandeur de l'image (*fig.* 357).

On trouvera d'abord par la formule du n° 509, que la distance $A\,P'$ est de $0^m,33$. Ainsi l'image se trouve placée dans la concavité du miroir à $0^m,33$. De plus, à cause de la similitude des triangles $P\,H\,C$ et $P'\,H'\,C$, on a $P\,H : P\,H' :: P\,C : P'\,C$, ce qui donne $0^m,0056$ pour $P'\,H$, ou la hauteur de l'image.

515. *Déterminations des foyers.* — Avant d'employer un miroir sphérique dans les expériences, il est utile d'en pouvoir déterminer le foyer. Cette opération est fort simple. Si le miroir est concave, on le présente à un objet lumineux et éloigné, au soleil par exemple, on reçoit l'image sur un petit carton; le point F, où elle offre le plus de netteté, est le foyer principal; la distance

A F est la distance focale principale; le double de *A F* est le rayon *A C* (*fig.* 363).

Si le miroir est convexe, il faut en couvrir la surface d'une feuille de papier, et mettre à nu, sur un même méridien, deux points à égale distance du centre de figure, présenter au soleil ce miroir ainsi disposé, recevoir sur un carton les rayons réfléchis jusqu'à ce que la distance *H K* (*fig.* 364) soit double de *M N*. Il est visible qu'alors *D F* sera double de *A F* ou de *D A*. Cette dernière est donc égale à la distance focale principale.

Caustiques.

516. Nous avons dit n° 506 que le foyer d'un miroir courbe n'est pas un point unique. Nous donnerons quelques nouveaux développemens sur ce sujet. Soit un point lumineux *P*, situé sur l'axe au delà du centre (*fig.* 327 *ter*). Considérons un certain nombre de rayons incidens voisins *p m*, *P n*, *P r*, *P x*, etc.; les rayons réfléchis se couperont deux à deux aux points *a*, *b*, *f*. Si les rayons incidens sont très voisins, les points *a*, *b* et *f* se confondront sensiblement en un point unique, qui sera le foyer du faisceau; dans le cas contraire, ils seront situés sur une courbe *a b f*, à laquelle les divers rayons réfléchis seront tangens. Cette courbe se nomme une caustique par réflexion. Il est évident qu'il s'en forme de l'autre côté de l'axe une autre *y' f* tout-à-fait semblable. Si au lieu d'une simple section de miroir nous supposons un miroir complet, les courbes se changeront en deux surfaces caustiques.

Chaque point de la caustique est un foyer; seulement il faut remarquer que les divers points n'ont pas la même intensité. L'image est visible pour toutes les positions de l'œil où cet organe reçoit une des tangentes à l'une ou à l'autre caustique.

517. *Emploi des Miroirs pour exciter la combustion.* — Quand on reçoit sur un miroir concave un faisceau de rayons solaires, parallèles à l'axe du miroir, il se concentre à son foyer une quantité de chaleur assez grande pour enflammer les corps combustibles, et même volatiliser les métaux.

L'aberration de sphéricité empêche qu'en agrandissant les dimensions du miroir, on n'augmente l'effet proportionnellement.

Le père Kirker a imaginé de substituer à un miroir courbe, un assemblage de miroirs plans, disposés de manière à déterminer la réunion des faisceaux lumineux en un même point.

Buffon fit construire un miroir polygonal composé de cent soixante-huit glaces étamées, susceptibles de se mouvoir en tout sens; de manière qu'étant le maître de varier l'inclinaison mutuelle des miroirs, on pouvait porter le foyer à différentes distances. Ce miroir brûlait le bois à 200 pieds, fondait les métaux (le plomb, le cuivre) à 45 pieds.

Ces expériences rendent moins improbable tout ce que l'histoire rapporte sur Archimède relativement au siége de Syracuse.

De la Réfraction.

518. La lumière éprouve à son entrée sous une incidence oblique dans les milieux diaphanes, une déviation à laquelle on a donné le nom de *réfraction*. Le point par lequel la lumière entre dans un milieu s'appelle point d'*immersion*, celui par lequel elle en sort point d'*émergence* (1).

L'angle d'incidence S I P (*fig.* 365) est formé par le rayon incident *SI* et la perpendiculaire *I P* menée par le point d'immersion à la surface *A B* du milieu; l'*angle de réfraction R I V* ou *R I U* est celui que forme le rayon réfracté *I V* ou *I U* avec la même perpendiculaire prolongée en *I R* (2).

519. *Loi de Réfraction.* En général, quand le second milieu est plus dense que le premier, l'angle de réfraction *R I V* (*fig.* 365) est plus petit que l'angle d'incidence *S I P*. Dans le cas contraire, l'angle *R I U* est plus grand que l'angle d'incidence *S I P*.

L'observation prouve, 1° que le rayon incident *S I*, la perpendiculaire *I R P* et le rayon réfracté *I V* ou *I U* sont dans un même plan; 2° *qu'il existe un rapport constant entre le sinus de l'angle d'incidence et le sinus de l'angle de réfraction.* Par exemple, si le passage de la lumière se fait de l'air dans le verre, le sinus d'incidence et au sinus de réfraction comme 3 est à 2; s'il se fait de l'air dans l'eau, ce rapport est celui de 4 à 3. Cette loi est connue sous le nom de loi de Descartes, parce que c'est à ce philosophe que la découverte en est due. Voici comment on la démontre par l'expérience.

Soit un prisme triangulaire *A B C* (*fig.* 389) d'une substance transparente, on le place de manière qu'une arête *A C* de sa base soit verticale et son axe horizontal. On fait arriver un rayon *D E* perpendiculairement à la face d'incidence *A C* : pénétrant la substance sans éprouver de déviation, il rencontrera la face *A B* avec sa direction primitive; à sa sortie de la face *A B*, il s'éloignera de la perpendiculaire et prendra la direction *E H*. On peut d'abord constater, à l'aide d'une règle verticale *l m*, que le rayon brisé *D E H* est dans un même plan, normal à la surface de séparation des deux milieux. On reconnaît de plus qu'il produit une image colorée et oblongue sur la règle *l m*. (Nous reviendrons sur cette dernière circonstance, à l'article *Dispersion*.) Il s'agit maintenant de s'assurer de la constance du rapport des sinus d'incidence et de réfraction. Pour

(1) Dans certains milieux cristallisés, le faisceau incident se partage en deux (Voyez *Double Réfraction*.) Il ne s'agit ici que de la réfraction simple.

(2) *Voyez*, à la fin de l'ouvrage, l'explication de la réfraction dans la théorie des ondes, et dans celle de l'émission.

cela, il suffit de connaître, dans la disposition que nous avons choisie pour le prisme, l'angle de réfraction, car l'angle d'incidence DEN est égal à l'angle réfringent CAB du prisme, l'angle de réfraction IEH se compose de IEF égal à l'angle d'incidence DEN, et de HEF. Pour avoir ce dernier, on mesure FH, qui est donné par les divisions de la règle lm et EF, distance de lm au prisme. La connaissance des deux côtés EF et FH fournira le troisième HE et le sinus de l'angle FEH, qui est égal à FH divisé par HE. En répétant cette expérience avec des prismes de même matière, mais d'angles réfringens différens, on trouvera que la valeur du rapport $\frac{\sin. i}{\sin. r}$ est constante sous toutes les incidences. On donnera plus loin les procédés imaginés pour déterminer ce rapport dans les substances solides, liquides ou aériformes. Ce rapport est connu sous le nom d'*Indice de réfraction*.

520. La connaissance de la réfraction de la lumière nous met à même de donner l'explication de plusieurs phénomènes. Ainsi, quand on se place à une certaine distance d'un vase vide, dans une position telle, que l'œil soit trop bas pour en apercevoir le fond, si l'on remplit le vase d'eau, le fond sera à l'instant aperçu, et cela parce que la lumière, en passant de l'eau dans l'air, éprouve une réfraction qui l'éloigne de la perpendiculaire, et la fait parvenir à l'œil, quoique le point aperçu en soit séparé par la paroi opaque du vase. L'apparence que présente un bâton plongé en partie dans l'eau s'explique de la même manière; la possibilité de voir le soleil ou tout autre astre placé au-dessous de l'horizon est encore due en grande partie à la réfraction qu'éprouve la lumière à son entrée du vide dans notre atmosphère.

521. *Réfraction dans les milieux terminés par des surfaces courbes.* L'indication des principaux résultats présentés par la lumière, à son entrée dans les milieux terminés par des surfaces courbes, est indispensable pour rendre facile la conception des instrumens d'optique, du mécanisme de la vision, etc.

Considérons d'abord un milieu en verre, indéfini d'un côté, et terminé de l'autre côté par une portion mAn de surface sphérique (*fig.* 369); supposons un rayon SI lumineux parallèle à l'axe AC du milieu $mAnC$. Pour bien apprécier le genre de déviation qu'éprouve ce rayon au point d'incidence I, il faut du centre C de la sphère mener le rayon CI, qui est perpendiculaire au plan tangent KL; ce dernier, puisqu'une surface courbe n'est que la réunion d'un nombre infini de surfaces planes, se confond avec la sphère au point I. La lumière, passant d'un milieu plus rare dans un milieu plus dense, se rapproche de la perpendiculaire, et va rencontrer l'axe AC en P. C'est en ce point P, qu'on nomme *foyer*, que se fait la concentration de tous les rayons parallèles à SI et également éloignés de l'axe.

Les rayons les plus éloignés de l'axe se réuniront en P', et les rayons les moins éloignés en P'', en sorte que le foyer n'est pas un point unique, mais il en approche d'autant plus que la surface mAn est moins étendue.

Si le point lumineux est placé sur l'axe en P (*fig.* 370), le rayon incident PI, faisant un angle d'incidence PIC' plus grand que dans le cas du parallélisme (*fig.* 369), donnera un angle de réfraction CIP' aussi plus grand, et le foyer P' devra être plus éloigné. L'inspection de la *fig.* 370 fait voir que, si le point lumineux était trop rapproché du milieu mAn, les rayons réfractés ne couperaient point l'axe; il résulte de cette remarque, que la marche du foyer P' est en sens inverse de celle du point lumineux (1).

(1) Appelons l le rapport $\frac{\sin. PIC'}{\sin. CIP'}$; ce rapport est sensiblement égal à $\frac{PIC'}{CIP'}$, vu la petitesse de ces angles; la comparaison des triangles PIC et CIP' donne $ACI = CIS' - CPI$ et $ACI = CIP + CP'I$; en multipliant cette dernière équation par l'indice de réfraction l, en retranchant la première, et effaçant CIS et son égal $CIP'l$, il vient $(l-1)ACI = CPI + lCP'I = API + lAP'I$; en substituant les tangentes aux angles, on a $(l-1)\frac{A'I}{A'C} = \frac{A'I}{A'P} + \frac{lA'I}{A'P'}$; en divisant tout par $A'I$, et remarquant que AA' est sensiblement nul, puisque l'arc AI est une très petite partie du cercle, on a, pour la relation cherchée :

$$\frac{(l-1)}{AC} = \frac{1}{AP} + \frac{l}{AP'} \quad (a).$$

Si l'on suppose $AP = \infty$ on a $AP' = \frac{AC \times l}{l-1}$; c'est là l'expression de la distance focale principale. On peut d'ailleurs la déterminer directement (*fig* 369). Si le point lumineux était trop près du milieu pour que la réfraction pût faire converger le rayon vers l'axe AC, on aurait (*fig*, 361), par un calcul tout-à-fait semblable, $\frac{l-1}{AC} = \frac{1}{AP} - \frac{l}{AP'}$ (*b*). De sorte qu'en remplaçant AC, AP, AP' par r, p et p', la formule générale est $\frac{l-1}{r} = \frac{1}{p} \pm \frac{l}{p'}$; le signe $+$ étant pris pour le rayon rencontrant l'axe dans le milieu (*fig.* 370).

Si l'on fait $p' = \infty$ dans la formule (a), on a $p = \frac{r}{l-1}$. Tout rayon parti d'un point de l'axe, à une distance du milieu plus petite que cette valeur de p, donnera la formule (b).

Pour appliquer ces formules à un milieu concave, il suffit de prendre r avec le signe $-$ *fig.* 371 *bis*; on a ainsi le résultat qu'on obtiendrait si l'on faisait le calcul comme pour le milieu convexe.

522. *Application.* — Un objet de longueur de $0^m,07$ est placé d'abord à $0^m,259$, ensuite à $5^m,35$, d'un milieu terminé par une sphère dont le rayon est égal à $0^m,75$: on demande la grandeur et la position de l'image. L'indice de réfraction $i=2/3$. Pour la première distance $0^m,259$, on trouve $AP'=-0,469$. Ce signe négatif indique que l'image se trouve hors du milieu du côté même de l'objet. La grandeur de l'image $A'H'$ est $0^m,085$ (*fig.* 371). Pour la seconde distance $3^m,55$, on trouve $AP'=4^m,074$ l'image se trouve dans le milieu (*fig.* 373). La grandeur en est déterminée par la comparaison des deux triangles semblables PHO et $OP'H'$ qui donnent $PH : P'H' :: OP : OP'$ ou $0,07 : P'H' :: 4,10 : 3,324$, d'où $P'H'=0^m,057$.

Ces deux exemples sont bien propres à montrer l'influence de la distance de l'objet sur la position de l'image.

Lentilles.

523. Ce qui précède nous met en état de connaître la marche que suit la lumière dans son passage à travers une lentille. Nous supposerons d'abord cette lentille biconvexe (*fig.* 374).

Pour trouver la déviation d'un rayon de lumière SI, parallèle à l'axe CAC', menez au point I d'incidence, le rayon de la sphère, il sera perpendiculaire au plan tangent KL. Le rayon lumineux se rapprochera de cette perpendiculaire, et suivra la direction Im; à la rencontre de la surface $A'm$, il éprouvera une seconde déviation, et au lieu de continuer sa route suivant la droite Imp', il s'écartera de la perpendiculaire $C'm$, et ira couper l'axe en P; ainsi il est visible que, si l'on suppose autour de l'axe CAC' une infinité de rayons parallèles à SI, et également éloignés de l'axe, ils iront couper ce dernier au même point P; pour les rayons plus ou moins éloignés de l'axe que le rayon SI, le foyer sera plus ou moins rapproché de la lentille (n° 521). Mais comme l'arc d'une lentille embrasse en général un petit nombre de degrés, ces divers point sont peu éloignés les uns des autres. Le point P s'appelle le *foyer principal* de la lentille, et AP la *distance focale principale*.

Les lentilles biconvexes concentrent la lumière à leur foyer et sont appelées, pour cette raison, lentilles *convergentes*. Les lentilles biconcaves dispersent au contraire la lumière, et ont reçu le nom de lentilles *divergentes*.

Soit le rayon SI faisant partie d'un faisceau cylindrique, parallèle à l'axe CAC' d'une lentille biconcave (*fig.* 376), et tombant en I, sur la surface antérieure de cette lentille; arrivé au point I, il sera réfracté, et, comme il passe de l'air dans le verre, il se rapprochera de la perpendiculaire et suivra la direction In; à la seconde surface, il subira une nouvelle réfraction, et au lieu de continuer de suivre la route rectiligne InD, il s'écartera de la perpendiculaire $C'm$, et prendra la direction nF.

Tout autre rayon de lumière tombant parallèlement à l'axe sur la lentille, s'éloigne de l'axe après son émergence, de sorte qu'après la réfraction il ne va pas rencontrer l'axe. Il n'y a donc ici aucun foyer réel; si l'on prolonge le rayon nF dans le sens Fn, il ira couper l'axe en P. On donne à ce point le nom de *foyer imaginaire* ou de *foyer virtuel*, pour le distinguer du foyer réel des lentilles convergentes, qui a une existence physique déterminée par la réunion effective des rayons.

524. Il y a encore des lentilles planes-convexes, planes-concaves et convexes-concaves; le rayon extérieur de ces dernières étant plus grand ou plus petit que le rayon intérieur (*fig.* 377). La différence de densité du verre et de l'air, combinée avec les diverses configurations, nous mènerait à des résultats qu'il est facile de prévoir. Pour tracer la marche de la lumière dans une lentille, il faut mener à chaque point d'incidence une perpendiculaire; si le passage se fait d'un milieu plus rare dans un milieu plus dense, la lumière se rapproche de la perpendiculaire; elle s'en éloigne dans le cas contraire.

525. *Détermination des foyers.* Pour connaître le foyer d'une lentille convergente, on expose cette lentille à une lumière très éloignée, à la lumière solaire, par exemple, et l'on reçoit l'image sur un carton; le point de la plus grande netteté est le foyer; la distance entre la lentille et le foyer est la distance focale principale.

L'opération de la détermination du *foyer virtuel* d'une lentille divergente (*fig*, 381), est un peu plus compliquée. On applique une feuille de plomb sur la face opposée à celle qui reçoit la lumière du soleil; on laisse seulement deux petites ouvertures a et b. On reçoit la lumière réfractée en H et en K sur un carton, qu'on fait mouvoir jusqu'à ce que la distance HK soit double de ab; dans ce cas, vu la similitude des triangles HKP et aPb, Pr est double de Po, et conséquemment de ro. Ainsi, quand le carton sera dans une position telle que HK sera double de ab, on mesurera la distance or, et l'on aura la distance focale principale, puisque $or = oP$ ou $o'P$; car l'épaisseur de la lentille est en général tellement petite, qu'on peut la négliger.

526. Le calcul donne pour la distance focale principale d'une lentille biconvexe la relation

$$\frac{l-1}{AC'}+\frac{l-1}{AC}=\frac{1}{AP} \text{ (fig. 374) (1).}$$

527. *Images produites par la réfraction à travers les lentilles.* Un objet lumineux PH est placé devant une lentille convexe AA' (*fig.* 382), à une distance finie et déterminée; on demande la position et la grandeur de l'image $P'H'$.

(1) *Calcul de la relation des deux foyers conjugués d'une lentille.*

Soit P un point lumineux sur l'axe CAC' de la lentille (*fig.* 380); un rayon PI de lumière parti de ce point, et rencontrant la lentille en I est réfracté suivant II'; si le milieu était indéfini, le rayon réfracté irait couper l'axe en P'; mais comme au point I' le rayon II' passe

Pour résoudre cette question, il faut d'abord définir *le centre optique*, ensuite indiquer la construction du foyer pour un point lumineux situé hors de l'axe.

1° Le centre optique est un point particulier, tel que tout rayon qui y passe, sort dans une direction parallèle à celle qu'il avait avant son entrée dans la lentille; de sorte qu'à cause de la petitesse de la lentille, la déviation est insensible.

Ce point O de l'axe est déterminé par la ligne qui joint les extrémités m et n de deux rayons parallèles (*fig.* 378, 379). Ce point est invariable; en effet, les

du verre dans l'air, il s'écarte de la perpendiculaire CI' et va couper l'axe en P'', plus près de la lentille. Il s'agit d'avoir la relation qui lie la distance donnée $A'P$ à la distance cherchée $A'P''$.

La note précédente donne pour $A'P'$ la relation:

$$\frac{l-1}{A'C} = \frac{1}{A'P} + \frac{l}{A'P'}$$

De plus, si un rayon de lumière parti de P'' tombait en $1'$ sur la face à nAm, il reprendrait la direction $I'I$; de sorte que si le milieu était indéfini, il faudrait prolonger ce rayon dans le sens $I'I$ pour qu'il rencontrât l'axe en P' la comparaison des triangles $P''IC$, $P'IC$ donnerait

$$\frac{l-1}{AC} = \frac{1}{AP''} - \frac{l}{AP'}.$$

Ajoutant ces deux équations, et observant que $A'P'$ est sensiblement égal à AP' vu la petitesse de l'épaisseur AA', on aura

$$\frac{l-1}{A'C} + \frac{l-1}{AC} = \frac{1}{AP} + \frac{1}{AP''}, \text{ ou en faisant}$$

$$AC = r,\ A'C' = r'\ AP' = p \text{ et } AP'' = p':$$

$$\frac{l-1}{r'} + \frac{l-1}{r} = \frac{1}{p} + \frac{1}{p'} \quad (d)$$

C'est là la relation cherchée.

Si le point p est placé à l'infini $A'P$ ou $p = \infty$, et la relation (d) devient $\frac{l-1}{r'} + \frac{l-1}{r} = \frac{1}{p'} = \frac{1}{f}$ (e).

On représente ordinairement la distance focale principale par une lettre particulière.

La formule (e) est applicable à toutes les lentilles, pourvu qu'on prenne r et r' positifs dans la convexité et négatifs dans la concavité, pour une lentille biconcave (*fig.* 381) $\frac{1}{AP''} = -\frac{l-1}{r'} - \frac{l-1}{r}$; pour une lentille plan convexe $\frac{1}{AP''} = \frac{l-1}{r}$; pour une lentille plan concave

$\frac{1}{AP''} = -\frac{l-1}{r}$; pour une lentille concave convexe $\frac{1}{AP''} = \frac{l-1}{r'} - \frac{l-1}{r}$

On trouverait d'ailleurs directement tous ces cas particuliers si l'on suivait la méthode exposée.

triangles cno et $c'mo$, donnent la proportion $co : oc' :: cn : c'm$, d'où $oc' + oc, cn + c'm :: oc : cn$ (lentille biconvexe ou biconcave), $co : cc' :: cn : c'm - cn$ (concave convexe); où trois termes sont évidemment constans pour une même lentille, co doit l'être aussi. Si un rayon lumineux tombe en n dans un inclinaison telle, qu'après sa réfraction, il aille rencontrer l'autre face en m, il est clair que le rayon émergent $s'm$ sortira parallèle au rayon incident sn, puisque les élémens m et n sont parallèles.

Le centre optique d'une lentille biconvexe ou biconcave formé de deux courbures égales, se trouve au milieu o de la lentille (*fig.* 379 et 386); dans une lentille plane convexe ou plane concave, au sommet de la partie courbe; enfin dans une lentille concave convexe o est hors de la lentille, du côté de la surface qui a le plus petit rayon (*fig.* 378).

2° Soit un point lumineux s situé hors de l'axe (*fig.* 387); il s'agit d'avoir la relation propre à faire connaître la distance op: pour cela on mène la ligne so par le centre optique; le foyer conjugué p se trouvera nécessairement sur le prolongement de cette ligne. On le déterminera en menant la ligne si parallèle à l'axe coc', et qui, après sa réfraction, va couper l'axe au foyer des rayons parallèles en f, et rencontre enfin en p la ligne so prolongée. A cause de la petite épaisseur de la lentille, on peut supposer la ligne sid complètement parallèle à l'axe cc'. On aura donc, en comparant les triangles semblables sdp et ofp:

$$sp : op :: sd : of.$$

528. En substituant aux distances conjuguées (n° 2) so, op, et à la distance focale principale of ces lettres p, p' et a qui les représentent, et faisant attention que sd égale sensiblement so, on a: $p + p' : p' :: p : a$, d'où l'on tire :

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{a}, \text{ ou bien } = \frac{l-1}{r} + \frac{l-1}{r'} \quad (f).$$

Cette relation est absolument la même que celle que nous avons trouvée pour un point placé sur l'axe.

529. Rien n'est plus facile actuellement que de trouver la position et la grandeur de l'image PH produite par une lentille, soit d'abord une lentille biconvexe (*fig.* 382). On mènera, de l'extrémité P de l'objet, la ligne POP' par le centre O optique de la lentille: cette ligne sera l'axe du faisceau de tous les rayons émanés du point P, et le foyer déterminé par la relation (f) sera en P'. De la même manière on détermine la position de tous les autres foyers, et conséquemment celle de l'image $P'H'$. On voit que l'image est *renversée* et placée au delà de la lentille, que le renversement tient à ce que les foyers se forment au delà du point de croisement des axes des faisceaux. On peut recevoir cette image sur un carton blanc; l'expérience réussit bien avec une bougie. On aura l'occasion de vérifier toutes les autres particularités du phénomène. Ainsi l'on verra

que l'image *s'éloigne* lorsque l'objet *s'approche*, et réciproquement.

Une lentille concave convexe, dont la partie convexe aurait le plus petit rayon, serait encore convergente (*fig.* 375). On mènerait les deux axes $P\,H'$ et $H\,P'$ par le centre optique, et l'image $P'\,H'$ serait réelle et renversée.

Si la lentille était biconcave (*fig.* 388), il n'y aurait pas d'image réelle; il faudrait faire rebrousser les rayons réfractés et émergens pour avoir l'image virtuelle $P'\,H'$, laquelle est droite et plus petite que l'objet.

Une lentille concave-convexe, ayant le rayon de la partie convexe plus grand que celui de la partie concave (*fig.* 386), serait divergente. Le rapport entre l'image et l'objet se trouverait, dans tous les cas, par la comparaison des triangles $P\,H\,O$ et $P'\,H'\,O$. Quant à la position, on l'obtiendrait par la formule des foyers conjugués (note, p. 222).

530. *Application aux lentilles.* 1re *Question.* Un objet $P\,H$ de $0^m,075$ (*fig.* 382) est à $1^m,25$ de distance d'une lentille en verre, placée dans l'air, et dont les courbures sont égales; le rayon de chacune de ses faces est $0^m,65$: on demande la grandeur et la position de l'image. L'indice de réfraction l est égal à 3/2. En faisant $l = 3/2$, $r = r' = 0^m,65$ et $p = 1^m,25$, dans la formule (d) de la note du n° 526, on trouve $O\,D' = 1^m,354$. L'image est donc placée à $1^m,354$ de la lentille en $H\,P$, mais par la similitude des triangles $P\,O\,D$ et $P'\,D'\,O$, ou des triangles $H\,O\,D$ et $H'\,O\,D'$, on a $P\,H : P'\,H' :: O\,D : O\,D'$, d'où $P'\,H' = \frac{P\,H \times O\,D'}{O\,D} = \frac{0,075 \times 1,354}{1,25}$ $= 0,^m081$. Telle est la grandeur de l'image.

2e *Question.* Le même objet $P\,H$, de $0^m,075$, est placé à $0^m,25$ de la même lentille; on demande la grandeur et la position de l'image.

L'image est placée à $0^m,406$ en-deçà de la lentille; la grandeur en est de $0^m,122$.

3e *Question.* Un objet $P\,H$, de $0^m,075$, est placé à une distance de $1^m,25$, devant une lentille biconcave à faces égales; le rayon commun $= 0^m,65$; trouver la position et la grandeur de l'image (*fig.* 388).

Nous avons dit que la formule des lentilles biconvexes est applicable aux lentilles biconcaves en changeant le signe des rayons. La formule des lentilles biconcaves est donc $-\frac{l-1}{r} - \frac{l-1}{r'} = \frac{1}{p} + \frac{1}{p'}$, ou puisque les rayons r et r' sont égaux, $-\frac{2\,(l-1)}{r} = \frac{1}{p} + \frac{1}{p'}$; faisant $r = 0^m,65$; $p = 0^m,25$ on trouve $p' = -0^m,427$. Le signe négatif indique qu'il n'y a pas d'image au delà de la lentille, mais en deçà, en $P'\,H'$; et l'on a, puisque les points A et O sont très rapprochés l'un de l'autre, $P\,H : P'\,H' :: A\,P : A\,P' :: p : p'$, d'où $P'\,H' = \frac{0^m,075 \times 0^m,427}{1^m,25} = 0^m,025$.

On trouverait de la même manière l'image produite à travers une lentille convexe-concave; alors les signes des deux rayons seraient l'un positif, l'autre négatif.

L'intersection des rayons réfractés donne naissance à des surfaces caustiques analogues à celles dont nous avons parlé pour la réflexion.

531. Dans tout ce qui précède nous avons supposé que le passage de la lumière se faisait toujours de l'air dans le verre, ou dans toute autre substance plus dense que l'air; c'est en effet là le cas le plus communément présenté par les observations et par les instrumens. Au reste, rien ne serait plus facile que de trouver la marche de la lumière dans le passage d'un corps plus dense dans un corps plus léger. Dans ce dernier cas, la lumière s'écarterait de la perpendiculaire, de sorte que les lentilles biconvexes deviendraient divergentes, et les lentilles biconcaves convergentes.

532. Les lentilles convergentes sont employées pour corriger le défaut de la vue appelé *presbytisme;* on sait que ce défaut consiste dans l'applatissement de la partie antérieure de l'œil : ce défaut existe chez presque tous les vieillards. La réunion des rayons lumineux envoyés par les objets s'opère au-delà de la rétine, et la vision est confuse. Une lentille convergente placée au devant de l'œil diminue la divergence des rayons, et en rend la réunion possible sur la rétine même : la division devient ainsi nette et distincte.

Le *miopisme*, défaut opposé au presbytisme, se rencontre chez beaucoup de jeunes gens. La trop grande convexité de l'œil réunit trop tôt les rayons lumineux, ce qui rend la vision confuse. Une lentille divergente placé au devant de l'œil augmente la divergence des rayons, les fait concourir sur la rétine, et la vision est distincte.

Comme la courbure de l'œil varie avec l'âge, le changement de verres devient nécessaire. (*Voyez* la Vision pour les lentilles périscopiques.)

Nous verrons plus tard beaucoup d'autres usages des lentilles.

533. *Lentilles en échelons.* Buffon et différens physiciens avaient conçu la possibilité de former des lentilles composées. Fresnel, dans ses recherches sur les phares, ayant songé à substituer des verres ardens au miroirs paraboliques employés jusqu'à ce jour, a dû naturellement chercher à perfectionner les grands verres lenticulaires, et a été conduit à former des lentilles en échelons.

Voici la manière de les construire. Du point P (*fig* 372) on décrit une portion de sphère $A\,B$, ensuite d'un point P' pris hors de l'axe, on décrit une autre surface sphérique. Continuant de la même manière, on obtient une lentille composée de diverses parties, dont la section par un plan

passant par l'axe est représentée par la *fig.* 390. Le calcul donne la position de chaque centre et la valeur du rayon correspondant. Ces lentilles exposées au soleil produisent à leur foyer une chaleur assez forte pour fondre de minces feuilles de tôle. Puisque ces lentilles réunissent en un point unique des rayons parallèles qui tombent sur leur surface, elles doivent rendre parallèles des rayons émis par un point lumineux placé à leur foyer. Mais une lumière ayant toujours des dimensions plus ou moins grandes, une portion du faisceau a une forme conique.

Lord Oxmantown vient de proposer des télescopes dont les miroirs sont formés d'un miroir circulaire et d'anneaux concentriques, travaillés les uns et les autres sur des sphères différentes. Le principe des lentilles annulaires transporté aux miroirs est très bon; il n'y a que la difficulté du travail qui puisse être un obstacle.

Indices de réfractions (1).

534. On a donné le nom d'indice de réfraction au rapport $\frac{\sin. i}{\sin. r}$

1° Ce rapport peut être déterminé pour les substances solides par le procédé rapporté n° 518, ou par le suivant, également applicable aux liquides et aux gaz.

Lorsqu'on regarde l'image d'un objet à travers un prisme, on remarque que cet objet se déplace avec le mouvement du prisme sur son axe. De plus on reconnaît que si l'on part d'une position extrême, pour faire tourner le prisme dans le même sens, l'image se déplace d'abord, puis s'arrête, puis se déplace de nouveau pour retourner à la position qu'elle avait d'abord. La déviation au moment où l'image est en repos correspond au *minimum* de l'angle de déviation.

Le calcul (1) montre et l'expérience vérifie qu'à la déviation minimum répondent des angles d'incidence et d'émergence égaux, ou que le rayon réfracté II' (*fig.* 326) forme un triangle isocèle avec les côtés du prisme, ou qu'enfin l'angle de réfraction est égal à $\frac{C}{2}$, C étant l'angle réfringent du prisme.

Cette dernière égalité résulte de ce que $\frac{C}{2}$ est complément de CII', qui est lui-même complément de l'angle de réfraction.

Dans la position minimum il suffit de déterminer l'angle de déviation $I'OS' = OdP$ ou D pour avoir l'indice de réfraction. En effet, si l'on mène du point O où est placé l'observateur, OB' et OC' l'une parallèle à AC, l'autre à BC, on a $D = 180° - S'OB' - B'OC' - C'OE = 2I - C$, puisque $EOC' = S'OB' = SIA = 90 - I$, et $B'OC' = C$, d'où $I = \frac{D+C}{2}$

$$\text{Ainsi } \frac{\sin. i}{\sin. r} = \frac{\sin. \frac{D+C}{2}}{\sin. \frac{C}{2}}$$

L'angle réfringent du prisme est connu (*voyez* Goniomètre). Il suffit donc de déterminer la déviation minimum pour avoir l'indice de réfraction. Pour obtenir cette déviation ou l'angle D, on fixe le prisme verticalement sur une alidade mobile; puis on dispose à peu de distance du prisme, à quelques pieds, par exemple, un cercle répétiteur, dont le limbe est horizontal et placé à la hauteur

(1) Dans l'hypothèse de l'émission, on a appelé *puissance réfractive* une fonction $u^2(l^2 - 1)$ de la vitesse de la lumière dans le vide, et du rapport de réfraction. Cette puissance est proportionnelle à la densité du milieu dans lequel la lumière a pénétré, de sorte que si l'on divise l'expression précédente par cette densité, que nous représenterons par d, le quotient $\frac{u^2(l^2 - 1)}{d}$ pourra être considéré comme puissance réfractive de chaque molécule. C'est ce qu'on a appelé *pouvoir réfringent*.

l, étant égal à $\frac{\sin. i}{\sin. r} = \frac{v}{u}$, $u^2(l^2 - 1)$ est égal à $v^2 - u^2$, ou à l'accroissement du carré de la vitesse de la lumière en passant du vide dans le corps, u est la vitesse de la lumière dans le vide, v la vitesse dans le corps.

u^2, étant facteur commun, peut être supprimé dans la comparaison des pouvoirs réfringens. Il ne reste donc qu'à déterminer la quantité l, que nous savons être égale au rapport $\frac{\sin. i}{\sin. r}$.

(1) Soit ACB, *f.* 326 bis, SI le rayon lumineux, II' le rayon réfracté et IO le rayon émergent correspondant, faisons $SIN = y$, $KIF = x$, $m\,IO = y'$, $KF'I = x'$ $BCA = C$ et $OdP = D$, on aura $D = y - x + y' - x'$, $x + x' = C$ et $D = y + y' - C$, $\sin. y = l \sin. x$; $\sin. y' = l \sin. x'$ (*a*).

Si l'on veut exprimer que D est un maximum ou un minimum, il faudra écrire que la différentielle en est nulle. Ainsi l'on aura $dy + dy' = 0$.

Mais on peut écrire les équations (*a*) sous la forme: $y = \text{arc.}(\sin. = l \sin. x)$, $y' = \text{arc}(\sin. = l \sin. x')$ d'où

$$dy = \frac{l dx \cos. x}{\sqrt{1 - l^2 \sin.^2 x}},$$

$$dy' = \frac{l dx' \cos. x'}{\sqrt{1 - l^2 \sin.^2 x'}},$$

mais $dy = -dy'$ et $dx = -dx'$ d'où

$$\frac{\cos. x}{\sqrt{1 - l^2 \sin.^2 x}} = \frac{\cos. x'}{\sqrt{1 - l^2 \sin.^2 x'}},$$

ce qui entraîne $x = x'$ et par suite $y = y'$

du prisme et de la mire. On dirige sur un point de la mire une des lunettes du cercle répétiteur. On cherche avec l'autre l'image réfractée dans la position minimum. L'angle des deux lunettes est précisément l'angle D. Il faut remarquer que, comme la mire est très éloignée, le rayon qui va directement de cette mire à la première lunette, est sensiblement parallèle au rayon qui part du même point et qui tombe sur le prisme.

2° On renferme les liquides dans des vases prismatiques formés par des glaces à faces planes et parallèles; car, des lames semblables ne changeant pas la direction de la lumière, la réfraction observée est due entièrement à la substance liquide. Voici la disposition qui paraît la plus avantageuse : on pratique une cavité cylindrique dans une plaque de verre épaisse, qu'on taille ensuite en prisme. On a soin que les deux faces soient bien planes et bien polies. On ferme cette cavité avec des lames de verre, également planes et polies; on les fixe avec des règles en cuivre. Pour introduire le liquide commodément, on creuse dans la plaque de verre un canal vertical $c\ d$, qu'on ferme avec un bouchon de verre (*fig.* 392). On s'assure, avant l'introduction du liquide, du parallélisme des faces de chaque lame.

3° Comme les gaz ont une réfringence beaucoup plus faible que les liquides, on donne au prisme un angle très grand; on emploie à cet effet un gros tube $m\ n$ (*fig.* 383) de verre, cylindrique et taillé en biseau à ses deux extrémités, lesquelles sont fermées par deux glaces à faces parallèles. Le diamètre du tube est de $0^m,045$, et la longueur de $0^m,25$ environ. Au tube est adapté un robinet, de manière qu'on peut y faire le vide. On y introduit ensuite le gaz qu'on veut soumettre à l'expérience. On en connaît l'élasticité et la température par un baromètre et un thermomètre : le premier est un tube recourbé $A\ B$. Les gaz doivent, avant leur introduction dans le prisme, être parfaitement desséchés; il faut de plus, dans les calculs, tenir compte de la température et de la pression de chaque gaz; en cherchant la déviation minimum produite par le prisme vide, et successivement rempli d'air ou d'un autre gaz, on peut appliquer la formule rapportée plus haut.

Il est indispensable de s'assurer d'abord si les lames de verre qui ferment le tube ont leurs faces parallèles; pour cela, on observe un objet à travers le prisme rempli d'air; s'il y a une déviation, elle ne peut être occasionée que par la légère inclinaison des faces des lames; on en tient compte. Ce procédé exige les plus grands soins dans les mesures, puisqu'un prisme d'un angle de 145°, d'abord vide, puis rempli d'air à $0^m,76$, ne produit qu'une déviation de 5 minutes environ. MM. Biot et Arago ont déterminé avec cet appareil les puissances réfractives de plusieurs gaz. (*Voyez* le t. 7 des *Mém. de l'Inst.*, 1806.)

On déterminera d'abord l'indice de réfraction pour le passage de lumière de l'air dans le vide, puis de l'air dans un gaz quelconque. Seulement il faut remarquer que la lumière, en passant de l'air dans le prisme vide, sera rejetée vers le sommet, puisqu'elle passe d'un milieu plus dense dans un milieu plus rare (*fig.* 326 *ter*). On aura par ces expériences les indices de réfraction des corps solides, liquides ou gazeux par rapport à l'air, et l'indice de ce fluide par rapport au vide. Pour rapporter tous les indices au vide, il faudra faire usage du théorème suivant.

l et l' étant les indices de réfraction de deux milieux par rapport à un troisième, l'indice du premier par rapport au second sera $\frac{l'}{l}$. Pour le démontrer on prend deux lames à faces parallèles, l'une formée avec le premier milieu, l'autre formée avec le second (*fig.* 327 *bis*), un rayon $S\ I$ tombant sur la première lame, sort de la seconde dans une direction $I'\ S'$ parallèle à $S\ I$. Mais on a $\frac{\sin.\ i}{\sin.\ r} = l$, $\frac{\sin.\ r''}{\sin.\ i''} = l'$ d'où $\frac{l'}{l} = \frac{\sin.\ r}{\sin.\ i''}$; puisque $i = r''$, mais $r = i''$ donc $\frac{\sin.\ i'}{\sin.\ r'} = \frac{l'}{l}$.

En ajoutant à cet appareil (*fig.* 384) un large tube rempli de mercure, on peut avoir le gaz à différens degrés d'élasticité. Si on laisse tomber le mercure par le robinet inférieur, le gaz se dilate et diminue de densité; l'élasticité en est mesurée par un baromètre communiquant avec le prisme, ou par la différence de niveau du mercure dans les tubes i et s. Si le gaz est de nature à corroder la pompe et le baromètre, dans ce dernier cas, il n'est plus retiré par la pompe, mais chassé, après l'opération, par un courant d'hydrogène ou d'acide carbonique. (M. Dulong.) (*Ann. de Ch. et de Phys.*, t. 31, p. 154.)

A l'aide de cet appareil, M. Dulong a mesuré les indices de réfraction d'un nombre considérable de fluides élastiques. Le procédé de ce savant académicien diffère de celui de MM. Biot et Arago. Il consiste à faire varier la densité du gaz intérieur jusqu'à ce que la déviation produite par ce gaz soit égale à celle que produit l'air atmosphérique sous une pression connue.

Si le gaz réfracte plus que l'air, M. Dulong le dilate; il le comprime dans le cas contraire. Et comme les puissances réfractives *d'un même gaz sont proportionnelles à sa densité*, on peut obtenir toutes les puissances réfractives, rapportées à celle de l'air prise pour unité.

Par exemple, le protoxide d'azote réfracte sous la pression $0^m,450$ autant que l'air sous $0^m,76$. On trouve 1,71 pour la puissance réfractive de ce gaz par la proportion

$$0,450 : 0,76 :: 1 : \varpi = 1,71.$$

M. Dulong a ainsi formé les tableaux suivans :

Puissances réfractives des gaz à la même température et sous la même pression, celle de l'air étant prise pour unité.

Noms des gaz.	Puiss. réfract.	Densité.
Air atmosphérique.	1	1,0000
Oxigène.	0,924	1,1026
Hydrogène.	0,470	0,0685
Azote.	1,020	0,976
Chlore.	2,623	2,47
Oxide d'azote.	1,710	1,527
Gaz nitreux.	1,03	1,039
Acide hydrochlorique.	1,527	1,254
Oxide de carbone.	1,157	0,972
Acide carbonique.	1,526	1,526
Cyanogène.	2,832	1,818
Gaz oléfiant.	2,302	0,980
Gaz des marais.	1,504	0,559
Ether muriatique.	3,72	2,234
Acide hydrocyanique.	1,531	0,944
Ammoniaque.	2,309	0,591
Oxichlorocarbonique.	3,936	3,442
Hydrogène sulfuré.	2,187	1,178
Acide sulfureux.	2,260	2,247
Ether sulfurique.	5,197	2,580
Soufre carburé.	5,110	2,644
Hydrogène phosphoré au *minimum*.	2,682	1,256

Si l'on veut déduire de là les puissances réfractives absolues, il faudra multiplier les nombres de la première colonne de ce tableau par 0,000589, puisque, d'après les observations astronomiques de Delambre et les mesures directes de MM. Biot et Arago, telle est la puissance refractive absolue de l'air sous la pression 0m, 76 et à zéro; en ajoutant l'unité, et en extrayant la racine carrée, on aura les indices de réfraction. Ces indices sont inscrits dans le tableau ci-joint, avec les puissances réfractives correspondantes.

Noms des gaz.	Indices de réfr. $i = \frac{\sin. i}{\sin. r}$.	Puissances réfr. ou $i^2 - 1$.	Puissances réfr. d'après MM. Biot et Arago.
Air atmosphérique.	1,000294	0,000589	0,000589
Oxigène.	1,000272	0,000544	0,000560
Hydrogène.	1,000138	0,000277	0,000285
Azote.	1,000300	0,000601	0,000590
Ammoniaque.	1,000385	0,000771	0,000782
Acide carbonique.	1,000449	0,000899	0,000899
Chlore.	1,000772	0,001545	
Acide hydrochlorique.	1,000449	0,000899	0,000879
Oxide d'azote.	1,000503	0,001087	
Gaz nitreux.	1,000303	0,000606	
Oxide de carbone.	1,000340	0,000681	
Cyanogène.	1,000834	0,001668	
Gaz oléfiant.	1,000678	0,001356	
Gaz des marais.	1,000443	0,000886	
Ether muriatique.	1,001095	0,002191	
Acide hydrocyanique.	1,000451	0,000303	
Gaz oxichlorocarbonique.	1,001159	0,002318	
Acide sulfureux.	1,000665	0,001331	
Hydrogène sulfuré.	1,000644	0,001288	
Ether sulfurique.	1,001153	0,003061	
Soufre carburé.	1,001150	0,003301	
Hydrogène proto-phosphoré.	1,000789	0,001579	

Nota. Nous avons rapporté les procédés suivis. On peut aujourd'hui déterminer l'indice de réfraction dans une chambre, avec une bougie pour mire.

Indices de réfraction de quelques substances.

Eau	1,34
Ether sulfurique	1,36
Alcool	1,37
Solution de potasse (d = 1,42)	1,41
Acide sulfurique (1,7)	1,43
Spath-fluor	1,44
Spermaceti (fondu)	1,45
Cire fondue	1,46
Alun	1,46
Huile de pavot	1,47
Sulfate de magnésie	1,47
Borax	1,47
Huile d'amande	1,47
Essence de térébenthine	1,47
Huile d'olive	1,47
Naphte	1,47
Gomme arabique	1,47
Huile de genièvre	1,49
Camphre	1,50
Spath d'Islande min.	1,488 / 1,519
Id. max.	1,657 / 1,665
Sulfate de fer (max)	1,49
Crown-glass	1,50 à 1,54
Nitre max.	1,51
Id. min.	1,33
Sélénite	1,52
Sulfate de cuivre max.	1,55
Id. min.	1,53
Copal, sucre	1,54
Feldspath	1,54
Carbonate de strontiane max.	1,70
Id. min.	1,54
Quartz ordin.	1,548
Id. extraordin.	1,558
Flint-glass	de 1,57 à 1,64
Topaze du Brésil ord.	1,63
Id. extraord.	1,64
Sulfate baryte ord.	1,62
Id. oxtraord.	1,64
Nacre de perle	1,65
Tourmaline	1,66
Sulfure de carbone	1,68
Verre contenant un plomb et deux flint	1,72
Id. trois plomb, quatre flint	1,73
Spinelle, Saphir (blanc)	1,77
Rubis	1,78
Zircon	1,95
Soufre	1,96 à 2,15
Phosphore	2,13 à 2,26
Diamant	2,44 à 2,76
Chromate de plomb min.	2,49
Id. max.	2,90

535. Voici les principales conséquences tirées des recherches sur les puissances réfractives.

1° En général, toutes choses égales d'ailleurs, les substances inflammables ont une puissance réfractive considérable (Newton). Nous voyons cependant que le chromate de plomb a une puissance réfractive plus considérable qu'aucune autre substance.

2° MM. Arago et Biot ont constaté que la puissance réfractive (1) d'un même gaz est proportionnelle à la densité de ce gaz. M. Dulong a vérifié cette loi sur plusieurs gaz que MM. Arago et Biot n'avaient pas soumis à leurs expériences.

3° MM. Arago et Petit ont reconnu que les vapeurs ont un pouvoir réfringent moindre que les liquides d'où elles émanent; du moins c'est le résultat fourni par le sulfure de carbone, l'éther sulfurique, et l'éther hydrochlorique. (*Ann. de Chim. et de Phys.*, t. 1.)

4° Un résultat encore très remarquable, c'est que l'eau, d'après M. Arago, réfracte de plus en plus, même en acquérant moins de densité par son refroidissement au-dessous de la température de 4°. D'après Euler, le verre chaud réfracte plus que le verre froid.

5° Il paraît bien démontré, par les expériences, qu'il n'existe aucun rapport simple entre les densités des substances élémentaires ou composées et leurs puissances réfractives. Ainsi la puissance réfractive de l'hydrogène est presque la moitié de celle du gaz oxigène, et la densité du premier gaz est 13 à 14 fois moindre que celle du second.

La puissance réfractive de la vapeur d'éther hydrochlorique est supérieure de 3/5 à celle de l'acide sulfureux; la densité de la première est plus faible que celle du second.

6° La puissance réfractive d'une combinaison gazeuse n'est pas la somme des puissances réfractives de ses élémens.

La puissance réfractive déduite des élémens de l'ammoniaque est d'un douzième plus grande que celle qui appartient réellement à ce gaz; les autres gaz et les vapeurs donnent des différences encore plus grandes.

7° La puissance réfractive d'un mélange gazeux est égale à la somme des puissances réfractives des élémens qui le composent.

Les résultats 3° et 4° ne sont pas favorables à la théorie de l'émission; dans cette théorie, le pouvoir réfringent d'un corps devrait être indépendant de l'état de ce corps.

Phénomène de la Réflexion totale.

536. *Fig.* 369 *bis*. Supposons que l'angle d'incidence devienne égal à un droit, ou en d'autres termes, que les rayons tombent parallèlement à la surface; on aura alors $\frac{1}{\text{sin. } r} = l$, ou $\text{sin. } r = \frac{1}{l}$,

(1) Ou en d'autres termes l'accroissement de vitesse de la lumière dans l'hypothèse de l'émission, ou la diminution de la vitesse dans l'hypothèse des ondes, en passant du vide dans ce gaz.

si le passage se fait de l'air dans l'eau, on aura $l = 4/3$, conséquemment $r = 48° 35' 25''$. La lumière ne peut pénétrer de l'air dans l'eau sous une plus grande obliquité. Il résulte de là, que si une lame opaque couvre la partie $B\ I$, aucune portion de la lumière de l'espace $A\ I\ P$ ne pourra pénétrer dans l'espace $B\ I\ V$, et réciproquement si un faisceau de lumière $I\ U$, provenant de l'espace $V\ I\ B$, tombe sur la face $A\ I$ sous une incidence plus grande que $P'\ I\ V$ suivant $I\ R$, elle se réfléchira dans l'intérieur, en suivant la loi de réflexion. C'est là le phénomène de la réflexion totale. L'angle r serait moindre pour le passage de la lumière de l'air dans le verre, on trouverait $r = 41° 48' 37''$

537. M. Wollaston a proposé un procédé ingénieux pour mesurer le pouvoir réfringent des corps opaques; nous ne donnerons qu'une idée succincte de ce procédé, fondé sur la réflexion totale de la lumière.

Pour constater le phénomène de la réflexion totale au contact de deux milieux, déposez une goutte d'un liquide, d'eau par exemple, sous un prisme triangulaire $A\ B\ C$ de verre (*fig.* 394). Nous venons de voir que l'angle limite est 41° 48' pour le verre. Ainsi tout rayon parallèle à $A\ B$ pénétrerait dans le prisme sous un angle de 41° 48' et irait frapper la face $B\ C$ sous l'angle de 48° 12', complément de 41° 48', il serait réfléchi; conséquemment aucun des objets placés au dehors de $A\ B$ ne pourrait être vu à travers $B\ C$. Mais on pourrait voir par la réflexion totale les objets situés au delà de $A\ C$. Supposons maintenant qu'on descende lentement l'œil le long de la règle divisée LL' et qu'à l'aide d'une plaque percée d'une petite ouverture, on regarde la face $A\ B$. On recevra d'abord la lumière des objets au-dessus de $A\ C$, et le point I où se trouve une goutte de liquide paraîtra comme une tache noire; mais bientôt la lumière sera réfléchie en ce point. L'angle $S\ I\ P$ sera l'angle limite pour le passage de la lumière du verre dans le liquide.

On a d'abord $\dfrac{\sin.\ F\ I'\ P'}{\sin.\ Q\ I'\ I} = l$. On connaît $F\ I'\ P'$ qui est le complément de $I'\ F\ P'$ observé directement. On reconnaîtra donc aussi $Q\ I'\ I$. Mais on a aussi $\dfrac{\sin.\ 90°}{\sin.\ S\ I\ P} = \dfrac{l}{l'}$, l' étant l'indice pour le liquide; d'où $l' = l \sin.\ S\ I\ P$. On donne ordinairement une autre forme à cette valeur de l', en l'exprimant en fonction de l'angle $I'\ F\ P' = \alpha$, observé directement. On a successivement $l'^2 = l^2 \sin.^2 S\ I\ P = l^2 - l^2 \cos.^2 S\ I\ P = l^2 - l^2 \sin.^2 Q\ I'\ I = l^2 - \cos.^2 \alpha$. S'il y avait en I un corps opaque, la formule employée serait $l^2 = l^2 - 2 \cos.^2 \alpha$ qu'on tire de la théorie mathématique de l'émission.

Voyez, à l'article du Microscope composé, un procédé de M. Brewster pour mesurer l'indice de réfraction des liquides et celui des corps mous ou semi-transparens.

Voyez aussi la Diffraction, pour un autre moyen de mesurer le rapport, proposé par M. Arago.

538. *Mirage*. Dans ce qui précède, nous avons considéré des milieux d'une densité uniforme; le mouvement de la lumière s'y est fait en ligne droite. Il n'en serait plus de même si la densité était variable. Un milieu d'une densité variable peut être considéré comme formé par la superposition d'une infinité de couches de densités différentes et d'une hauteur très petite, de sorte que la direction du rayon s'y trouve à chaque instant modifiée. Si la densité des couches va en décroissant de haut en bas, le rayon de lumière parcourra ce milieu suivant une courbe dont les deux branches seront symétriques (*fig.* 393). Si un observateur se trouve placé en D, et qu'il regarde un objet B, il pourra voir deux images; l'une directement en B, et l'autre dans la direction de la tangente $D\ B'$.

La première, formée par un faisceau de lumière qui a traversé une couche d'eau qui a à peu près la même densité, la seconde est donnée par la réflexion totale sur une couche d'air, après avoir subi des inflexions successives.

On donne naissance à un milieu dont la densité va en croissant de bas en haut, en remplissant une caisse de charbons ardens; les gaz produits dans la combustion sont d'abord très dilatés et conséquemment très légers; mais à mesure qu'ils s'élèvent, ils se refroidissent et se condensent. On obtient un décroissement inverse en mettant dans un verre, d'abord de l'acide sulfurique concentré, ensuite de l'eau; si l'on colle sur un point du verre une petite bande de papier, et qu'on la regarde à travers le liquide, on la verra également double.

539. On a observé depuis long-temps un phénomène connu sous le nom de *Mirage*.

Ce phénomène se produit souvent en Égypte; pendant le milieu de la journée, les rayons du soleil élèvent la température d'un sol formé de sable, dont la capacité pour la chaleur et très faible. La couche en contact avec le sol prend aussi une température élevée et se dilate assez pour acquérir une densité moindre que celle des couches supérieures. L'atmosphère présente alors des densités croissantes du sol à une certaine hauteur. Les rayons qui arrivent des objets sous un angle assez faible, donnent naissance à une courbe (*fig.* 395). L'observateur aperçoit deux images, l'une droite et dans le lieu de l'objet, l'autre renversée $A'\ B'$ et inférieure à l'image directe $A\ B$. Le soir et le matin, le terrain ayant une température ordinaire, l'aspect du pays n'offre rien de particulier; les objets paraissent dans le lieu qu'ils occupent réellement; mais au milieu de la journée, le terrain semble terminé par une inondation générale; les différens objets, les villages entiers paraissent être au milieu des eaux. Sous chaque village on en voit l'image renversée comme elle paraîtrait au

milieu d'un lac. A mesure qu'on avance, les limites de cette inondation s'éloignent; enfin elle disparaît totalement. Cette illusion est souvent cruelle dans le désert, parce qu'elle présente l'image de l'eau dans le moment où l'on en aurait le plus grand besoin (Monge).

MM. Biot et Mathieu ont fait, dans leur séjour près de Dunkerque, des observations sur le mirage. (*Voyez* les *Mémoires de l'Institut*, 1809.)

On a quelquefois occasion d'observer ce phénomène en mer; il y est moins fréquent et y a moins de durée.

Il s'est présenté sur le lac de Genève à MM. Jurine et Soret.

Décomposition de la Lumière.

540. Jusqu'ici nous avons considéré la lumière comme composée de faisceaux simples; cette supposition est très éloignée de la réalité : la lumière qui nous vient du soleil et de tous les corps lumineux est formée de sept couleurs principales, qui sont le violet, l'indigo, le bleu, le vert, le jaune, l'orangé et le rouge. Chacun de ces faisceaux porte en soi une couleur primordiale, et d'autres qualités qui lui sont propres. Du mélange de ces sept faisceaux, naissent toutes les couleurs présentées par la nature et les arts; de leur réunion résulte la blancheur.

Grimaldi avait aperçu la décomposition de la lumière opérée par le prisme; mais c'est réellement Newton qui, par un choix heureux d'expériences confirmatives les unes des autres, l'a démontrée de la manière la plus complète. Commençons par reconnaître l'inégale *réfrangibilité* des couleurs différentes. Pour cela il nous suffira de regarder à travers l'angle réfringent d'un prisme droit en verre, bien net, une bande de papier horizontale moitié peinte en rouge et moitié en bleu. On reconnaîtra, si le sommet de l'angle réfringent du prisme est en haut, que la bande bleue est plus élevée que la bande rouge; pour comprendre que cette séparation est une suite de l'inégale réfrangibilité des deux couleurs, il faut tracer la marche de chacune. Soit CAB (*fig.* 396) la section verticale d'un prisme, A l'angle réfringent, c'est-à-dire l'angle à travers les faces duquel s'effectue le passage de la lumière; soit SI un rayon parti de la bande rouge : ce rayon éprouvera à son entrée dans le prisme une réfraction qui le rapprochera de la perpendiculaire NN', puisqu'il passe en I de l'air dans le verre; en I' il s'écartera de la perpendiculaire, et prendra la direction $I'O$ de sorte que l'œil placé en O croira l'objet en S'; mais il est facile de voir que le déplacement de l'objet sera d'autant plus grand que la réfraction sera plus considérable. Si donc la couleur bleue se réfracte plus que la couleur rouge, la bande bleue sera plus élevée, ce qui a lieu en effet.

Si donc la lumière blanche est composée de rayons inégalement réfrangibles, la séparation s'en opérera à travers le prisme, et la décomposition de la lumière solaire sera démontrée.

Pour réaliser cette expérience, pratiquez au volet d'une chambre obscure une petite ouverture de 2mm de diamètre; placez un prisme sur le passage d'un faisceau solaire SI (*fig.* 397), et dans une position telle que l'axe en soit perpendiculaire à la direction du faisceau; vous remarquerez que l'image reçue sur un carton MN est beaucoup agrandie dans le sens MN, parce que la réfraction du prisme s'exerce dans ce sens, qu'elle est terminée par deux lignes droites $M\,u\,N$ et $M\,v\,N$ et par deux arcs de cercle M et N; que le violet est la couleur la plus réfrangible, que le rouge est celle qui l'est le moins, et que l'ordre de réfrangibilité est le suivant, violet, indigo, bleu, vert, jaune, orangé et rouge. Cette image a reçu le nom de *spectre solaire;* elle est environ cinq fois plus longue que large. Il faut que le carton sur lequel on reçoit l'image soit au moins éloigné de douze pieds pour que les diverses nuances soient bien tranchées. La cause de la forme de l'image est visible; en effet tous les rayons rouges du faisceau ayant une même réfrangibilité doivent former une image rouge circulaire. Il doit en être de même des rayons orangés, etc.; ces différentes images superposées ont leurs centres sur une même ligne droite perpendiculaire à la direction du prisme. Le spectre qui résulte de la réunion de toutes ces images doit donc être terminé latéralement par deux lignes droites parallèles, et à ses deux extrémités supérieure et inférieure par un arc de cercle; tandis que, si toute la lumière jouissait de la même réfrangibilité, le spectre se présenterait sous l'aspect d'une image circulaire, qui serait déplacée par l'effet de la réfraction, mais qui ne serait nullement altérée dans ses dimensions. En effet, supposons que, dans une certaine position du prisme, l'angle PIA (*fig.* 399) soit égal à l'angle BEO; dans ce cas, les angles CIE et $CE'I'$, complémens des angles de réfraction, sont aussi égaux, et l'égalité des angles $CI'E'$ et CEI en est une conséquence; puisque la somme des angles de chacun des deux triangles CIE et $CI'E'$ qui ont un angle en commun C vaut deux droits. On a donc aussi $QI'A = OEB$; d'où $QI'A - PIA = OEB - OE'B$. Mais $OEB - OE'B$ est l'angle EOE' sous lequel on aperçoit l'objet PQ à travers le prisme; $QI'A - PIA$ est l'angle PHQ sous lequel on l'aperçoit sans l'interposition du prisme. Or, ces deux angles sont égaux; la grandeur de l'objet ne serait donc pas changée par le prisme si tous les rayons avaient la même réfrangibilité. La position dont il est ici question est celle de la déviation minimum (*voyez* p. 234).

Vous pouvez par une expérience synthétique confirmer l'analyse précédente; recevez pour cela le spectre solaire à une certaine distance sur une lentille convergente, vous verrez que l'image produite au foyer est blanche.

Si l'on tourne devant l'œil un carton sur lequel soient peintes les diverses couleurs, chacune avec l'étendue qu'elle a dans le spectre, on verra le carton blanc.

541. Les rayons qui appartiennent à chaque cercle sont tous également réfrangibles, car la réfraction à travers un, deux ou même trois prismes n'augmente nullement le nombre des faisceaux; chaque couleur reste la même, seulement la plus réfrangible est la plus déviée. Ainsi, si l'on reçoit le spectre vertical produit par le passage d'un rayon solaire à travers un prisme horizontal sur un second prisme vertical, on obtiendra un spectre oblique.

La *fig.* 398 donne la position de la seconde image par rapport à la première. Si le second prisme est parfaitement égal au premier et incliné sur la lumière incidente de la même manière, l'effet sur chacun des rayons en sera nécessairement égal à celui du premier prisme; d'où il suit que l'extrémité R' de la nouvelle image sera autant écartée de l'extrémité R de la première que celle-ci l'était de l'image directe C. On aura donc $RR' = RC$; de même $VV' = VC$. Le triangle $VV'C$ est isocèle et la seconde image est inclinée à la première de 45 degrés.

542. La disposition des couleurs dans le spectre solaire, où l'on voit le vert entre le jaune et le bleu, l'orangé entre le rouge et le jaune; le souvenir de ce qui se pratique dans les arts, où le mélange du jaune et du bleu est employé pour donner le vert, où l'orangé est souvent formé par la réunion du rouge et du jaune, avait fait penser à quelques savans que l'orangé et le vert du spectre étaient formés par la superposition des deux couleurs, entre lesquelles chacune de ces couleurs se trouve placée dans le spectre. Il est vrai que, si l'on réunit par une lentille le jaune et le rouge du spectre, on a l'orangé; qu'on obtient de la même manière le vert par la réunion du jaune et du bleu; mais il y a cette différence essentielle entre ce vert et cet orangé, et les mêmes teintes données immédiatement par le spectre, que celles-ci sont tout-à-fait inaltérables et indivisibles, tandis que le vert et le jaune artificiels sont séparés par le prisme en leurs couleurs élémentaires.

543. L'apparence présentée par les objets blancs vus à travers le prisme trouve son explication dans ce qui précède; en effet, supposons que le prisme ait son angle réfringent en haut et son axe horizontal, et qu'on examine à travers le prisme une bande infiniment mince de papier blanc; l'effet du prisme dans cette position est, comme nous l'avons vu (*fig.* 396), de relever l'image; les rayons les plus réfrangibles sont les plus déviés : ainsi l'on aperçoit un spectre dont la partie supérieure est violette, et la partie inférieure rouge. Les autres couleurs sont disposées dans l'ordre que nous avons reconnu. Supposons maintenant qu'au lieu d'une bande élémentaire, on examine une feuille de papier de plusieurs pouces de largeur. La partie supérieure offre toujours le violet, la partie inférieure le rouge; tandis que le milieu ne présente que du blanc. Le bord supérieur de la bande donne un spectre, il en est de même de toutes les bandes élémentaires dont la feuille est composée; la partie violette de la bande supérieure est tout-à-fait isolée, ainsi que la partie rouge de la bande inférieure; le violet de la seconde bande peut se mêler au rouge de la première, et ainsi de suite, de sorte qu'on ne doit apercevoir au milieu que du blanc résultant du mélange de toutes ces couleurs.

544. *Inégale réflexibilité des rayons.* Pour reconnaître l'inégale réflexibilité des différens rayons, Newton fit tomber un faisceau de lumière solaire dans une chambre obscure, perpendiculairement à la face AC d'un premier prisme BAC, dont les angles C et B étaient de 45° (*fig.* 401); le faisceau suivait sa route en ligne droite jusqu'en I; là, une portion réfléchie allait frapper la face AB aussi dans une direction perpendiculaire; ce rayon allait rencontrer un second prisme PNQ, et frapper sous une incidence oblique la face d'entrée NP et de sortie NQ. Le spectre rejeté vers la base allait se peindre en $R'V'$ sur un carton disposé à cet effet; maintenant, en faisant tourner le prisme ABC de manière à diminuer l'angle d'incidence CID, et conséquemment à augmenter la réflexion sur la face CB, Newton remarquait que la partie violette du spectre $R'V'$ devenait plus intense, tandis que la partie correspondante du spectre RV produit sur un carton par la portion de lumière réfractée en I s'affaiblissait; qu'ensuite la même chose avait lieu pour la couleur indigo, etc., et qu'enfin la lumière rouge était la dernière à se réfléchir totalement en I. Ainsi il est démontré que le violet, rayon le plus réfrangible, est aussi le plus réflexible, et que l'ordre de réflexibilité est le même que l'ordre de réfrangibilité. (*Voyez* l'Optique de Newton.)

545. *Propriétés calorifiques des rayons.* C'est à Rochon (*Recueil de Mémoires sur la Physique et la Mécanique*) qu'on doit les premières observations sur ce sujet; il reconnut en 1775 que les différens rayons produisent sur le thermomètre des degrés de chaleur différens. Dans ces expériences, un faisceau de lumière élémentaire allait frapper un thermomètre après s'être condensé par son passage à travers une lentille convergente. Rochon a trouvé que le rayon rouge possède la propriété d'échauffer au plus haut degré; l'intensité calorifique décroît du rouge au violet, peut-être dans le rapport de 30 à 1.

M. Leslie a aussi reconnu que le rayon rouge échauffe plus que le rayon violet : la position du maximum de température dépend de la nature chimique du prisme. Un prisme de crownglass le donne dans le rouge, un prisme d'acide sulfurique dans le vert, enfin l'eau le donne dans le jaune (M. Seebech). Avec un prisme de flint, Herschel a constaté l'existence du maximum au delà des rayons hors du spectre.

M. Melloni a confirmé l'expérience d'Herschel, en

substituant au prisme de verre un prisme de sel gemme. On explique ces résultats en admettant que les prismes de nature différente absorbent diversement les différens rayons calorifiques qui accompagnent les rayons du spectre. M. Melloni pense que l'absorption est en sens inverse de la réfrangibilité. *Arch. phys.*, t. 53, p. 69.)

546. *Propriétés chimiques des différens rayons.* La lumière solaire exerce une action puissante sur les phénomènes chimiques; la présence de la lumière nécessaire à la formation de la matière verte des végétaux, et du composé de chlore et d'oxide de carbone, son action sur le chlorure d'argent, en sont des preuves assez manifestes.

L'analogie nous conduit à demander si cette propriété réside au même degré dans tous les rayons. Déjà Shéele (*Traité chimique de l'Air et du Feu*, p. 78 et 98) avait remarqué que le rayon violet opère plus promptement qu'aucun autre rayon la réduction de l'oxide d'argent. Senebier a fait ensuite une remarque semblable relativement au développement de la matière verte des végétaux.

D'après MM. Wollaston, Ritter et Bockmann, l'action chimique s'étendrait même au delà du rayon violet, hors de la limite du spectre.

Les expériences de M. Bérard, dans lesquelles ce physicien a exposé, soit du chlorure d'argent, soit un mélange de chlore et d'hydrogène, aux différens rayons, concentrés par une lentille convergente, confirment pleinement les résultats des physiciens que nous venons de citer. Pour donner une idée de l'accroissement de l'intensité chimique vers la partie violette, il suffira de rapporter que du chlorure d'argent tenu pendant deux heures dans la lumière rouge ainsi condensée, n'éprouvait pas d'altération sensible, tandis qu'en moins de cinq minutes il se colorait assez fortement dans la partie violette. M. Bérard a aussi constaté l'existence de rayons chimiques invisibles au delà des rayons violets.

D'après les expériences de M. Arago, des rayons lumineux dirigés de manière à donner de l'obscurité par leur interférence, n'exercent plus aucune action chimique.

547. *Propriétés magnétiques. Voyez* le magnétisme, p. 183.

548. *Propriétés éclairantes.* Le rayon jaune possède le maximum de clarté, le rayon vert jouit à peu près au même degré de cette propriété qui a ensuite une dégradation insensible jusqu'au violet, où se trouve le minimum (Herschel). Newton avait déjà, dans son Optique, donné des résultats peu différens.

549. Les résultats que nous venons de rapporter sur les propriétés des différens rayons de la lumière solaire ont fait naître deux opinions : selon l'une, il existerait trois espèces de rayons, de sorte que le spectre devrait être considéré comme l'assemblage de trois spectres superposés ; selon l'autre, les actions chimique et calorifique seraient réunies dans les mêmes rayons à celle qui produit la sensation de la lumière et des couleurs.

D'après la première opinion, la chaleur et la lumière constitueraient deux fluides différens, tandis que d'après la seconde, on les considérerait comme des modifications d'un même fluide. L'état actuel des connaissances ne permet pas encore de décider complètement laquelle des deux opinions doit être adoptée; il convient dans des questions de ce genre de s'en rapporter aux faits observés et d'attendre les progrès ultérieurs de la science. (*Voyez* l'article *Ondulation*.)

550. En examinant le spectre solaire à l'aide d'une forte lunette, on y remarque une multitude de lignes transversales parallèles noires, et ne présentant aucune régularité dans leur nombre, dans leur position ni dans leur intensité. La lumière électrique, celle d'une lampe à huile, à alcool ou à gaz, donnent des raies brillantes au lieu de raies noires; la lumière des planètes se comporte comme celle du soleil, seulement il est à remarquer que la lumière de Vénus donne des raies moins nettes vers les extrémités du spectre que celles de Sirius, surtout une dans le vert, deux dans le bleu, sont distinctes de celles du soleil par leur aspect. Les raies du spectre, observées d'abord par Wollaston, ont été étudiées avec un grand soin par Fraunhofer. Ce savant s'est assuré que la nature, l'angle réfringent et la position du prisme n'ont aucune influence sur la forme, la disposition et le nombre de ces lignes. Il a également reconnu des lignes semblables dans les deux faisceaux provenant de la subdivision d'un même rayon par un cristal doué de la double réfraction.

On observe ces raies de la manière suivante : on concentre à l'aide d'une lentille cylindrique la lumière solaire, transmise par une fente étroite et rectiligne. On reçoit ce faisceau rectiligne sur un prisme bien pur, dont les arêtes lui sont parallèles. Enfin, on examine le spectre à l'aide d'une bonne lunette achromatique.

La découverte de ces lignes est très importante; elle permet de fixer les rayons colorés du spectre, dont on donne les indices de réfraction.

La *fig.* 3, pl. 17, représente, l'une le spectre avec les diverses couleurs, l'autre avec les raies. Fraunhofer a choisi les sept raies marquées *B C D E F G H*, pour servir de point de repaire. On peut compter six à sept cents raies dans la longueur du spectre.

DE LA VISION.

Structure de l'œil.

551. L'œil est logé dans une cavité qu'on appelle *orbite*; il présente plusieurs membranes dont les deux plus extérieures en déterminent la forme sensiblement sphérique; l'une, qui occupe le fond de l'œil, se nomme *sclérotique*, ou *cornée opaque*,

à cause de la nature de sa substance, qui ressemble à celle de la corne (*fig.* 403); l'autre, beaucoup plus mince, d'un diamètre et d'une étendue moindres, enchâssée dans la sclérotique et formant la partie antérieure de l'œil, a reçu le nom de *cornée transparente*.

A la face interne de la cornée opaque est une membrane cellulo-vasculaire renfermant une matière colorante assez foncée : on l'appelle *choroïde*. Cette partie de l'organe contribue à la netteté de la vision, en absorbant toute la lumière qui tombe sur sa surface (1). Enfin sur la choroïde se trouve appliquée la *rétine*, membrane blanchâtre, transparente et mince. On pense généralement que c'est sur elle que s'opère la sensation; elle est l'épanouissement du nerf optique. La rétine chez l'aigle, le vautour, etc., est plissée.

Vers l'endroit où la cornée opaque s'unit à la cornée transparente, la choroïde se détache et se divise en deux lames; la première, qui est antérieure, produit cette couronne colorée, appelée *iris*, qui, à son centre, présente une ouverture connue sous le nom de *pupille*. La seconde lame se nomme *couronne ciliaire*.

L'iris est un assemblage de fibres musculaires, les unes orbiculaires et rangées autour de la prunelle, les autres dirigées vers son centre : l'usage de ces fibres est de rétrécir la pupille pour modérer l'impression d'une lumière trop vive, et de la dilater pour laisser entrer avec plus d'abondance une lumière faible. La pupille humaine varie de 3mm,3 à 6mm,6 du passage d'une lumière vive à une lumière faible (Young).

L'iris arrête les rayons qui s'écartent trop de l'axe; il a l'avantage, par sa position dans l'œil, de laisser entrer une plus grande quantité de lumière qu'il ne le ferait s'il était placé dans la cornée transparente, puisque l'humeur aqueuse, faisant converger les rayons lumineux, détermine à entrer dans la pupille des rayons qui iraient tomber sur l'iris, s'il n'y avait pas de réfraction dans l'humeur aqueuse, ou si l'iris était placé sur la cornée transparente.

L'iris, disposé comme un diaphragme dans l'œil, affaiblit l'aberration de sphéricité du cristallin. (*Voyez* plus loin Aberration de sphéricité.) Et ce qui est bien remarquable, c'est que la disposition des couches dont ce dernier est formé, concourt au même but; en effet, on a reconnu qu'elles augmentent de puissance réfractive de la circonférence au centre, où se trouve le noyau le plus dense et le plus réfringent.

C'est l'iris qui donne à l'œil sa couleur. La couronne ciliaire tient enchâssé un corps solide, diaphane, qui a la forme d'une lentille convergente, et qu'on appelle *cristallin*. Il est plus plat en avant qu'en arrière, et s'aplatit de plus en plus avec l'âge.

La partie antérieure de l'œil, comprise entre la cornée transparente et le cristallin, est remplie d'une liqueur diaphane semblable en apparence à de l'eau, et qui a reçu le nom d'*humeur aqueuse*.

Dans la cavité postérieure située derrière le cristallin se trouve une liqueur semblable à du verre fondu, nommée *humeur vitrée*. Dans la *fig.* 403, *A B* représente la cornée opaque; *C D* la cornée transparente (1); *E F* la choroïde; *H K* la rétine; *I V* le cristallin; *U* l'humeur aqueuse; *M* l'humeur vitrée (2). (*Voyez* pour plus de détails *les ouvrages d'Anatomie et de Physiologie*.)

552. *Marche des rayons dans l'œil.* On appelle axe de l'œil la ligne suivant laquelle il se dirige pour voir nettement les objets.

L'action de l'œil est analogue à celle de la réunion de plusieurs lentilles. En effet, soit *A* (*fig.* 404) un point lumineux placé devant l'œil; certains rayons, émanés de ce point, arriveront sur la cornée transparente avec un certain degré de divergence, lequel diminuera et dans le cristallin et dans l'humeur vitrée. La forme concave et la moindre réfringence de l'humeur vitrée tendent à porter vers l'axe les rayons à leur sortie du cristallin dans l'humeur aqueuse. Toutes les parties de l'œil contribuent donc à faire concourir sur la rétine les rayons divergens qui arrivent du même point d'un objet.

553. Les rayons lumineux venus des objets éloignés forment une petite image renversée des objets.

L'inspection seule de la figure 413 prouve qu'il ne peut pas en être autrement.

Le renversement des objets dans le fond de

(1) La choroïde est plus foncée en couleur chez les habitans de la zone torride que chez les peuples du Nord (Home). Elle n'existe pas chez les animaux ruminans et chez les oiseaux de nuit.

(1) Le rayon de *AB* chez l'homme est d'environ 10mm; celui de *CD* d'environ 7mm, 5.

(2) Voici les rapports entre le sinus d'incidence et le sinus de réfraction pour le passage de la lumière de l'air dans la substance :

Eau pure.	1,336
Humeur aqueuse.	1,337
Humeur vitrée.	1,339
Enveloppe extérieure du cristallin.	1,377
Centre du cristallin. . . .	1,399

M. Brewster (*Ann. de Chim. et de Phys.* t. 11.)

M. Chossat trouve le même rapport égal à 1,338 pour l'humeur vitrée.

Selon le docteur Wollaston, le rapport croît de 1,380 à 1,447 de la circonférence au centre du cristallin.

Il résulte aussi des recherches de M. Chossat, que les faces du cristallin et de la cornée transparente (œil de bœuf) sont des segmens d'ellipsoïde de révolution (*Ann. de Chim. et de Phys.*, *t.* 10).

D'après M. Chossat, les humeurs de l'œil des animaux (poissons, quadrupèdes et oiseaux) auraient une puissance réfractive sensiblement plus forte que chez l'homme. (*Ann. de Chim. et de Phys.*, t. 8, p. 217.)

l'œil peut être constaté; l'expérience réussit parfaitement avec un œil de bœuf dont on amincit la cornée opaque. Si l'on présente à un œil frais ainsi préparé, une petite bougie, on voit, en se plaçant par derrière, une image renversée de la bougie peinte sur le fond de l'œil. L'observation est même plus facile en opérant, comme l'a fait M. Magendie, sur des yeux de lapins albinos. On sait que les yeux de ces animaux sont dépourvus de choroïde, et que la partie postérieure en est transparente.

554. *Netteté de la vision à différentes distances.* D'après la ressemblance qui existe entre l'œil et la chambre obscure, la possibilité de voir nettement les objets à différentes distances paraît devoir tenir à la faculté de changer ou la distance entre le cristallin et la rétine, ou la courbure du cristallin et de la cornée transparente, ou enfin l'ouverture de la pupille.

1° On a cru que les muscles droits qui font mouvoir l'œil dans son orbite, peuvent aussi allonger cet organe; mais on démontre qu'il faudrait que l'œil prît la forme d'un ellipsoïde dont le grand axe surpassât d'un septième l'axe de l'œil dans l'état ordinaire. Une pareille extension ne paraît pas compatible avec la force de la sclérotique.

De plus, si cet allongement avait lieu, la forme de la cornée transparente devrait changer; or, quand on examine, à l'aide du microscope, une image réfléchie par l'œil d'une personne en même temps qu'on lui présente deux objets inégalement éloignés, on n'aperçoit pas la plus petite variation ni dans la grandeur, ni dans la position de l'image réfléchie. (Th. Young.)

D'un autre côté, si l'on met devant l'œil un tube de verre cylindrique, rempli d'eau, qui s'appuie sur lui, et dont l'autre extrémité soit fermée par une lentille biconvexe, l'humeur aqueuse ayant la même densité que l'eau, il est clair que les rayons, dans leur passage de la deuxième dans la première, ne devront éprouver aucune déviation, de sorte que la marche de ces rayons sera indépendante de la courbure de la cornée transparente. Cependant cet appareil ne modifie nullement la formation des foyers des rayons visuels, puisqu'il n'affaiblit pas la faculté de voir à différentes distances. (Th. Young.)

2° Examinons l'explication qui aurait pour base quelque altération du cristallin. On sait que cette lentille présente, à une dissection délicate, un grand nombre de couches très minces. Th. Young admettant, avec quelques anatomistes, l'analogie du cristallin avec les muscles, suppose que chaque couche voisine possède une certaine contractibilité; en sorte que, dans cette manière de considérer le cristallin, le gonflement qui accompagne la contraction d'un muscle augmenterait la convexité du cristallin, et conséquemment diminuerait la distance focale. Pour connaître la valeur de l'explication du docteur Young, il faudrait des expériences précises sur des personnes opérées de la cataracte. Malheureusement ces expériences manquent; car les faits cités par le célèbre physicien anglais sont plutôt défavorables que favorables à son opinion, puisqu'ils prouvent que des individus opérés de la cataracte conservent la faculté de voir distinctement dans des limites assez étendues (de sept à quinze pouces). (Bien entendu que ces individus doivent faire usage des verres convergens.) Au reste, l'hypothèse de Th. Young n'expliquerait que la possibilité de discerner les objets placés en deçà de la portée ordinaire de la vue; il resterait toujours à rendre raison de la faculté de voir nettement au delà; c'est un défaut commun à toutes les théories fondées sur les mouvemens internes de l'œil. (M. Dulong, *Journal des Savans*, 1818.) Mais ne pourrait-on pas dire que la couronne ciliaire étend le cristallin par sa contraction?

Voici une expérience décrite d'abord par Scheiner, qui paraît très propre à décider si le foyer des rayons visuels ne coïncide avec la rétine que pour une seule distance. Supposons que des rayons partis d'un point éclairé aillent, après avoir traversé une lentille convergente, former une image sur un carton situé au foyer. Si l'on place entre le point et la lentille un morceau de papier dans lequel on aura pratiqué deux petites fentes très rapprochées, si l'on porte maintenant le carton au delà du foyer, on verra deux images semblables. Ce résultat serait encore obtenu si, la lentille et le carton conservant la même position, le point lumineux était rapproché ou éloigné de la lentille. Remplaçons le point lumineux par une ligne inclinée à l'axe de la lentille : le seul point de cette ligne dont le foyer conjugué correspond à la position du carton aura une image unique, les autres en auront une double. Nous ne supposons pas les deux ouvertures et la ligne dans un même plan, en sorte que l'ensemble se présentera sous la forme de deux lignes qui se coupent. Voici l'application de cette expérience : Pour savoir si les cônes de lumière réfractée ont toujours leur sommet sur la rétine, il suffira de regarder une ligne droite inclinée sur l'axe optique, à travers deux petites fentes assez près l'une de l'autre, pour que la pupille puisse recevoir de la lumière par l'une et par l'autre à la fois. Car, d'après ce qui vient d'être dit, lorsqu'on regardera tous les points compris entre les limites extrêmes de la vue, chaque point regardé, devant paraître simple et étant le seul qui doive paraître tel, formera toujours le sommet commun de deux angles opposés qui suivra tous les mouvemens de l'axe optique. Cette expérience ne fournit pas toujours le même résultat. Dans le plus grand nombre de cas, le point de décussation correspond à une distance invariable pour le même individu; quelques personnes peuvent, au contraire, par un effort plus ou moins pénible, le rapprocher ou l'éloigner à volonté. (Discussion citée de M. Dulong.)

3° Une explication qui a réuni assez de partisans

est celle qui a été proposée par La Hire. D'après ce savant, c'est l'iris qui joue le principal rôle; cette partie de l'œil peut, par sa contraction, arrêter des rayons trop divergens. On conçoit que, l'ouverture de la prunelle diminuant d'étendue, la vision soit encore nette, quoique le foyer ne soit plus sur la rétine. On sait d'ailleurs que, dans la chambre obscure, on distingue assez bien les objets inégalement éloignés. La vision peut donc être nette, quoique l'image ne tombe pas exactement sur la rétine. Cette théorie est appuyée par l'expérience suivante. Si l'on place un corps très près de l'œil, on le voit confusément, mais on le voit nettement aussitôt qu'on interpose entre l'œil et l'objet une carte percée d'un trou. La carte arrêtant les rayons qui s'écartent le plus de l'axe, le foyer n'est pas aussi éloigné de la rétine, et l'image est moins confuse. Il existe certainement pour chaque individu une distance déterminée, à laquelle la vision est le plus nette; mais l'invariabilité de l'œil ne paraît pas, d'après ce qui vient d'être dit, incompatible avec la faculté de discerner les objets inégalement distans.

4° M. Vallée suppose que les rayons lumineux décrivent dans l'humeur vitrée des courbes en se rapprochant de l'axe optique, jusqu'à ce que leur mouvement lui soit parallèle. Cette hypothèse suppose une variation de densité de l'humeur vitrée, depuis le cristallin jusqu'à une certaine distance de la rétine, ce qui n'est pas parfaitement prouvé. M. Lehot (*Mémoire sur la Vision*) a vu le faisceau lumineux converger vers l'axe et ensuite s'en éloigner. Cette expérience est contraire à la théorie de M. Vallée (1).

Il résulte de tout ce qui précède, que, dans l'état actuel de la science, aucune explication de la netteté de la vision à différentes distances n'est à l'abri de toute objection. L'hypothèse proposée par La Hire est la plus satisfaisante.

Il est probable que la longueur de l'œil, l'iris, le cristallin et la cornée transparente, subissent, pendant que la vue s'exerce à diverses distances, des modifications plus ou moins fortes. Cela paraît d'autant plus admissible, que tous les changemens qui pourraient s'opérer dans les diverses parties de l'organe concourent au même but. Ainsi, supposons que, pour un objet placé au delà de la vision distincte, la cornée transparente s'aplatisse, la même traction aplatirait le cristallin et raccourcirait l'œil. La contraction pour un objet placé en deçà de la distance de la vision distincte s'expliquerait de la même manière.

(1) M. Lehot propose une nouvelle théorie de la vision, d'après laquelle les images seraient formées dans l'humeur vitrée, et auraient trois dimensions. On se rendrait compte dans cette théorie de la vision à des distances supérieures de celles de la vision distincte. Mais est-il prouvé que l'humeur vitrée soit analogue aux nerfs? mais comment expliquer l'illusion complète de certaines peintures? (*Voy.* les divers Mém. publiés par ce savant.)

555. *Unité de l'impression produite dans les deux yeux.* Quoique chaque objet que nous regardons ait son image dans chacun des deux yeux, nous ne voyons pas les objets doubles, parce que nous avons reconnu, par l'expérience du toucher, qu'un objet simple produit deux images peintes sur des parties semblables des rétines, de sorte que nous avons lié l'idée de l'unité de l'objet avec le sentiment des mêmes impressions. Mais lorsque les deux axes optiques ne concourent plus vers un même point, les images ne tombent plus sur des parties correspondantes des rétines, et l'objet est vu double. On peut faire l'expérience en pressant un des yeux en même temps qu'on regarde un objet; dans ce cas, l'objet paraît double. Voilà l'explication donnée généralement. Les faits suivans précisent cette explication.

On sait que les nerfs optiques, à peu de distance de leur origine, se réunissent et paraissent complètement confondus l'un avec l'autre; et que de ce point de réunion partent deux nerfs, dont l'un aboutit à l'œil droit et l'autre à l'œil gauche. On a appelé du nom de *décussation* cette portion commune, dans l'idée que les nerfs s'entrecroisent pour aller chacun à l'œil du côté opposé à celui de son origine.

Plusieurs personnes ont été atteintes d'une cécité partielle et momentanée. M. Wollaston éprouva à des époques très éloignées cette cécité partielle. Soudainement il ne vit que la moitié de la figure des personnes; voulant lire le mot *Johson* écrit sur une porte, il ne voyait que *son*. La vue ne s'exerçait qu'à droite, soit qu'il regardât avec l'un ou l'autre œil; la cécité n'était pas tout-à-fait complète, mais les objets paraissaient couverts d'une ombre intense et sans limites bien définies. Dans une autre circonstance la cécité était à droite.

M. Arago s'est trouvé, au mois de septembre 1824, dans un cas tout-à-fait semblable. Il ne voyait que *être* dans le mot *baromètre*. Ce savant a aussi reconnu que dans certaines circonstances, l'œil, sans offrir entre ses diverses parties des différences aussi tranchées, n'est pas également propre dans toute son étendue à percevoir de faibles impressions lumineuses. Ainsi, en 1822, il ne pouvait voir un satellite de Saturne qu'en dirigeant ses regards sur le bord de l'anneau le plus éloigné du satellite.

Richter rapporte des cas analogues.

D'après ces faits, il paraîtrait que le nerf optique droit communique avec la partie droite de chaque œil (*fig.* 414), par réflexion avec l'œil droit, et directement avec l'œil gauche et réciproquement. Cette opinion, émise par Taylor, Wollaston, etc., fournit peut-être une explication satisfaisante de l'unité d'impression.

556. Une expérience de Mariotte, que chacun peut répéter, indique que la rétine ne présente pas la même sensibilité dans toute son étendue, et même que le point de l'insertion du nerf optique en est tout-à-fait dépourvu. Ce point a été appelé *punctum cæcum*. En effet, si l'on place deux objets à deux

pieds de distance l'un de l'autre environ, et qu'on s'en éloigne ensuite peu à peu, en dirigeant l'œil droit sur l'objet qui est à gauche et en face duquel on se trouve, à la distance de neuf pieds on cessera de voir l'autre objet, qui reparaîtra si on continue de s'éloigner. (Mariotte, p. 496.)

L'expérience réussit d'une autre manière. On place sur un carton noir deux petits disques blancs dont les centres sont à trois pouces l'un de l'autre. On tient l'œil droit verticalement au-dessus du disque gauche et l'on ferme l'œil gauche; la ligne qui joint les deux yeux doit être parallèle à celle qui joint les centres des disques. A la distance de douze pouces on ne voit que le disque gauche, mais pour peu qu'on s'écarte de la position de douze pouces, on aperçoit deux disques. Les distances indiquées varient pour les différentes vues.

557. La sensation produite sur la rétine a une durée appréciable; on le prouve en faisant tourner un charbon rouge : lorsque le mouvement a un certain degré de rapidité, on croit apercevoir une ligne circulaire rouge; de même, si l'on fait tourner un carton circulaire sur lequel sont peintes les sept couleurs du prisme, le carton paraît blanc.

La sensibilité de l'œil s'émousse par la durée et par la répétition d'une même sensation; au bout d'un certain temps il devient inhabile à la percevoir. Par exemple, si, après avoir fixé la vue longtemps sur un objet d'un rouge vif, on porte ses regards sur un carton blanc, l'œil, devenu insensible à l'action de la couleur rouge, ne sera affecté que par les autres couleurs; de sorte que le carton blanc paraîtra verdâtre; l'illusion n'a pas une longue durée. En général la couleur que l'on aperçoit est complémentaire de celle qu'on a regardée d'abord, c'est-à-dire que, réunie avec elle, elle produit le blanc; c'est là ce qu'on entend par *couleurs accidentelles*.

558. *Usage des lentilles pour remédier aux défauts de la vue, chez les presbytes et les miopes. Voyez* le n° 531. Les personnes qui font usage des lunettes ordinaires ne voient distinctement que les objets situés dans l'axe de la vision. La vision sur les bords est toujours incertaine, à cause des grandes réfractions que les rayons y subissent.

Wollaston a proposé l'emploi de verres qu'il a appelés *périscopiques*, à l'aide desquels on voit nettement les objets placés dans différentes directions. Si ces verres doivent remplacer les lentilles convergentes, on leur donne la forme *A* (*fig.* 405), dont la partie antérieure a la plus grande courbure; les verres destinés à remplacer les lentilles divergentes ont la forme *A'*, celles-ci ont la partie antérieure moins courbe. La forme de ces verres périscopiques montre que les rayons obliques, comme ceux qui arriveront dans la direction de l'axe tomberont sous des incidences à peu près normales aux surfaces du verre. L'expérience a prouvé en faveur de l'heureuse invention de Wollaston. (*Bulletin de la Société philom.*, 1813.)

559. *Appréciation de la distance.* Nous jugeons de la distance d'un objet par l'angle que font les deux axes optiques dirigés sur un même point de cet objet. A mesure que l'objet s'approche ou s'éloigne, les yeux changent leur direction de manière à faire toujours concourir les deux axes optiques vers le même point de l'objet. La comparaison fréquente de la distance des objets avec le mouvement des yeux, nous a donné l'habitude de juger de la distance par les impressions liées à ces mouvemens. Mais si nous n'employons qu'un œil, nous ne déterminons que très imparfaitement les distances; par exemple, avec un seul œil on parvient difficilement à enfiler un anneau suspendu de manière que l'on ne puisse pas en voir l'ouverture. Et même des personnes privées d'un œil depuis long-temps ne jugent les distances qu'imparfaitement.

560. *Estimation de la grandeur.* On appelle *angle visuel* l'Angle *A o B* (*fig.* 413) formé par deux rayons qui, partant des extrémités d'un objet, viennent se croiser dans la prunelle. La considération de cet angle est importante relativement aux phénomènes de la vision. Derrière l'angle *A o B*, il s'en forme un autre *a o b*, qui provient des mêmes rayons réfractés à travers les humeurs de l'œil. Cet angle *a o b* sous-tend l'image *a b* sur le fond de l'œil; il est visible qu'il augmente et qu'il diminue en même temps que l'angle *A o B*.

On appelle *grandeur apparente* d'un objet, l'ouverture de l'angle visuel; d'où l'on voit que la grandeur réelle est constante, tandis que la grandeur apparente varie continuellement avec la distance. Ainsi, le concours des deux yeux est nécessaire pour apprécier les distances, tandis qu'un seul œil suffit pour estimer la grandeur.

Nous ne jugeons nullement de la grandeur réelle des objets par la seule grandeur apparente; nous tenons compte de la distance, parce que les expériences que nous avons faites avec le secours du tact nous ont appris à apprécier exactement les dimensions et les distances des objets. Ainsi une ligne de huit mètres vue à un mètre de distance ne nous paraîtrait plus avoir que deux mètres à la distance de quatre mètres; mais combinant la distance avec la grandeur apparente, nous rendons à l'objet sa grandeur réelle. Il faut dire que, lorsque les objets sont très éloignés, la petitesse des angles visuels et des angles formés par les axes optiques, empêche l'estimation des distances, et l'on juge de la grandeur réelle par la grandeur apparente. Alors les objets paraissent plus petits qu'ils ne sont réellement.

A l'appui des considérations précédentes, sur l'influence de l'habitude, nous rapporterons un exemple frappant. Un jeune homme âgé de treize ans, aveugle de naissance, auquel M. Chelseden venait de faire l'opération de la cataracte, pensait que tous les objets touchaient ses yeux; il ne pouvait concevoir que des tableaux représentassent des corps solides, etc. Ce ne fut qu'après plusieurs

mois d'expériences qu'il jugea des formes, des grandeurs et des distances.

561. *Illusions d'optique.* Un observateur placé à l'extrémité d'une longue avenue formée de deux rangées d'arbres parallèles, les voit converger à l'autre extrémité, parce que les intervalles entre deux arbres correspondans sous-tendent des angles qui deviennent de plus en plus petits. C'est par une cause semblable qu'étant à l'entrée d'une longue galerie, le parquet paraît aller en s'élevant et le plafond en s'abaissant.

On explique encore très bien pourquoi une pièce d'eau semble s'élever pour un observateur placé à l'une de ses extrémités : cet observateur compare le plan de la surface de l'eau à un plan horizontal passant par l'œil. De même, si l'on se trouve au pied d'une haute tour, elle paraît penchée, parce que l'on compare la position de cette tour à une verticale passant par l'œil ; de même encore, un terrain élevé *a c* nous paraît plus long que dans le cas où il serait de niveau avec l'horizon *a b* (*fig.* 418). Une ligne droite très étendue paraît courbe. Placé parallèlement à l'un des côtés d'un polygone régulier, on croit ce côté plus grand que ceux qui sont obliques.

Un astre paraît plus petit au zénith qu'à l'horizon. Les objets placés à la surface de la terre nous permettant de mieux apprécier la distance, nous croyons l'astre plus éloigné, et, comme il sous-tend dans notre œil le même angle dans les deux cas, il doit paraître plus grand à l'horizon. Le brouillard nous fait voir les objets plus éloignés que dans un temps serein, parce qu'il nous les fait voir moins éclairés.

Les illusions produites par les corps en mouvement sont aussi très nombreuses. En général, si nous faisons des mouvemens sans nous en apercevoir, nous les rapportons en sens contraire aux objets qui nous environnent. C'est ainsi qu'étant tranquilles sur un bateau qui se meut, nous voyons les objets environnans se mouvoir en sens contraire. C'est encore par une illusion de ce genre qu'on attribue au soleil le mouvement diurne de la terre, etc.

Si nous courons vers un objet très éloigné, et sensiblement immobile, nous voyons cet objet courir avec nous.

Telle est la théorie de la vision le plus généralement admise aujourd'hui.

DE L'ARC-EN-CIEL.

562. L'arc-en-ciel, par la variété et la magnificence de ses couleurs, semble inviter le physicien à rechercher les causes de sa production.

Ce météore n'apparaît que sous deux conditions indispensables, la présence du soleil sur l'horizon, et la résolution d'un nuage en pluie : de plus il faut pour qu'un observateur l'aperçoive, qu'il ait le dos tourné au soleil et qu'il soit placé entre cet astre et le lieu où tombe la pluie, afin que la lumière directe n'efface pas la faible lumière réfractée et réfléchie par le nuage.

On aperçoit presque toujours deux arcs, lesquels offrent les couleurs du spectre. Dans l'arc intérieur en commençant par le haut, les couleurs sont dans l'ordre : rouge, orangé, jaune, vert, bleu, indigo et violet. Dans l'arc extérieur, l'ordre des couleurs est inverse.

Assez rarement on aperçoit un troisième arc.

Avant qu'on connût la composition de la lumière, il était impossible de donner une explication complète de l'arc-en-ciel ; conséquemment la théorie de ce phénomène ne peut dater que de Newton ; cependant Descartes en avait eu une idée très nette. En effet, il avait bien vu la marche des rayons lumineux dans les gouttes de pluie ; il avait bien vu aussi que parmi tous les rayons qui pénètrent dans ces gouttes, il n'y a que ceux qui tombent sous un certain angle qui puissent revenir au spectateur sans s'affaiblir ; il avait même fait l'expérience, en recevant dans une chambre obscure des rayons solaires sur un matras plein d'eau, qu'il élevait et abaissait à volonté (1).

563. Voyons la marche de la lumière : nous supposerons d'abord le soleil réduit à un point. Nous n'aurons besoin de considérer que ce qui se produit dans le plan passant par l'astre, le centre de la goutte et l'œil de l'observateur. Soit un faisceau solaire *S I* (*fig.* 406). A son incidence en *I*, une portion pénétrera dans la goutte, et se réfractera à la manière ordinaire. En *I'*, il se fera une nouvelle séparation, une portion sortira, une autre se réfléchira et ira frapper la surface de la goutte en *I''*, et ainsi de suite. La lumière réfractée en *I''* peut rencontrer l'œil de l'observateur placé en *O*. La position de ce dernier, relativement au soleil, montre que la lumière qui n'a pas été réfléchie dans la goutte est perdue pour lui.

Le rayon émergent en *I''* éprouve une dispersion tout-à-fait pareille à celle qu'il subit à la sortie d'un prisme ; les deux rayons extrêmes sont marqués *I'' R* et *I'' V*. L'œil recevra dans le plan que nous avons considéré, un mélange de rayons, de sorte que la sensation sera confuse, et de plus l'impression sera faible à cause de la dilatation du faisceau, et de la perte faite dans le passage de la lumière à travers la goutte.

Il faut pour que l'œil ait une sensation vive des diverses couleurs, que chacune d'elles offre un faisceau de rayons non divergens, mais parallèles à leur émergence ; ce sont ces rayons qui ont été appelés *efficaces*.

564. On peut découvrir, soit par l'expérience, soit par le calcul, sous quelles conditions les rayons

(1) Il paraît que long-temps avant Descartes, le frère Théodoric, en 1300, expliquait l'arc-en-ciel. (*Ann. de Chim. et de Phys.*, t. 6.)

efficaces se produisent. Voyons d'abord l'expérience, nous prendrons ensuite le calcul.

Si l'on fait tomber un certain nombre de rayons de lumière sur une goutte d'eau sphérique (*fig.* 408), et qu'on cherche l'angle de déviation, c'est-à-dire l'angle formé par le rayon incident, avec le rayon perçu par l'observateur, on trouvera qu'il est nul sous l'incidence perpendiculaire; qu'il augmente ensuite jusqu'à une certaine limite d'incidence égale à environ 59° 23′ 30″ pour les rayons rouges. Cette déviation est de 42° 1′ 40″ pour une seule réflexion intérieure.

Des rayons peu éloignés et parallèles, tombant sous cette incidence sur la goutte, en sortiront encore parallèles, quoique la déviation générale du faisceau soit de 42 degrés.

On conçoit donc que l'œil, placé à une grande distance de la goutte, ne soit affecté que par ces rayons, puisque ces derniers, vu leur parallélisme, ont conservé leur intensité, tandis que les autres se sont affaiblis par la dilatation (1).

585. Si l'on suppose une suite de globules disposés circulairement à côté les uns des autres, de manière à former la base d'un cône dont le soleil occupe le sommet, un observateur placé sur l'axe dans un point convenable pourra recevoir à la fois de tous ces globules des rayons colorés; la bande circulaire ainsi formée aura une certaine largeur à cause de l'ouverture de la prunelle.

Nous avons trouvé 59° 23′ 30″ pour l'incidence qui donne le maximum de déviation dans le cas d'une seule réflexion intérieure des rayons rouges. Nous trouverions pour le maximum de déviation des rayons violets 40° 16′ sous l'incidence 58° 40′; les couleurs intermédiaires donneraient des déviations comprises entre 42° et 40°.

Par la valeur des angles de déviation, on voit pourquoi la partie inférieure de l'arc est violette, et la partie supérieure rouge. Ce sera le contraire pour deux réflexions; en effet, dans ce dernier cas, les angles de déviation sont : 50° 58′ pour les rayons rouges, et 54° 9′ pour les rayons violets (1).

Il résulte de ce qui précède, que la figure 409 représente fidèlement l'aspect de l'arc-en-ciel. Le soleil supposé à l'infini est en S, le spectateur en O, et la pluie en $v\,r\,v'\,r'$.

(1) *Calcul de l'angle d'incidence correspondant au maximum ou au minimum de déviation.*

Soit un rayon $S\,I$ (*fig.* 410) qui, après la réfraction dans la goutte d'eau, prenne en I la direction $D\,A$; l'angle de déviation D sera égal à $2\,r - 2\,i + 180°$; i étant l'angle d'incidence, r l'angle de réfraction. En effet, la somme des quatre angles du quadrilatère $C\,I'D\,I'$ est égale à quatre droits; de plus, les angles i et i' sont égaux à cause de la symétrie de la figure; il en est de même de r et r'; on aura donc

$$D + 2\,i + C = 2.\,180°,$$
$$\text{ou } D + 2\,i + 180° - 2\,r = 2.\,180°,$$
$$\text{ou } D = 2\,r - 2\,i + 180°.$$

Dans la *fig.* 411, qui représente le cas de deux réfractions séparées par une réflexion intermédiaire, où $I\,C\,I''$ est double de $I\,C\,I'$, on aura

$$D + 2\,i + 2\,(180° - 2\,r) = 2.\,180°.$$

d'où $D = 4\,r - 2\,i \ldots (a)$.

Pour les trois incidences, *fig.* 412, on aurait

$$D + 2\,180 - 2\,i + 2\,180° - 3\,(180° - 2\,r)$$

d'où $D = 3.\,2\,r + 2\,i + 180° = 2.\,180°$

ou $D = -(3.\,2\,r - 2\,i - 180°)$ (o).

La loi des valeurs de D est évidente; après n incidences intérieures, la valeur de l'angle de déviation sera

$$D = 2\,n\,r - 2\,i - (n - 2)\,180 \ldots (b).$$

Il serait trop long de mettre dans ces deux formules (a) et (o) les différentes valeurs de l'angle d'incidence i et les valeurs correspondantes de l'angle de réfraction r pour les sept couleurs. Il sera beaucoup plus commode de rechercher la valeur de l'angle d'incidence correspondante au maximum ou au minimum de l'angle de déviation D. Pour la découvrir, il faudra appliquer à chacune des expressions les conditions analytiques du maximum ou du minimum, ce qui se fera en égalant la différentielle de chaque expression à zéro.

L'expression (a) donnera $2\,d\,r - d\,i = o$, mais la différentiation de $\sin.\,i = l\,\sin.\,r$ donne $d\,i\,\cos.\,i = l\,d\,r\,\cos.\,r$.

Substituant dans cette dernière à $d\,i$ sa valeur $2\,d\,r$, on a $2\cos.\,i = l\cos.\,r$; ajoutant le carré de cette équation au carré de $\sin.\,i = l\sin.\,r$, on a

$$4\cos.^2 i + \sin.^2 i = l^2, \text{ d'où } \cos.\,i = \sqrt{\frac{l^2 - 1}{3}}$$

En opérant de la même manière sur l'équation (b), on aura

$$\cos.\,i = +\sqrt{\frac{l^2 - 1}{n_2 - 1}} \quad (o)$$

Si l'on donne à n successivement les valeurs 2, 3, etc., on aura les valeurs des angles d'incidence qui correspondent aux angles de déviation maximum et minimum, et conséquemment aux rayons efficaces.

Par exemple, pour deux incidences intérieures, on fera $n = 2$ dans (a), ce qui fournira l'angle d'incidence i. Par le rapport de réfraction, on aura r; enfin en mettant $n = 2$ et les valeurs de i et de r dans (b) on aura D. Les résultats de ce calcul sont rapportés dans le n° 523.

(1) Pour concevoir que l'angle $S\,D\,O$ (*fig.* 400) arrive à une limite, il faut observer qu'il a pour valeur le double de l'arc $d\,k$. En effet, cette valeur est : $1/2\,(I\,I' - v\,l) = I\,f - v\,d = I\,p + p\,f - v\,d = v\,k + d\,k - v\,d = v\,d + 2\,d\,k - v\,d = 2\,d\,k$. Maintenant soient deux rayons parallèles $S\,I$ et $S'\,I'$ incidens (*fig.* 408); à mesure que l'arc $p\,i$ devient plus oblique, le rayon réfracté s'incline davantage, et il arrive un terme où les deux extrémités des rayons réfractés se confondent en un point d. Au delà de ce terme, les rayons réfractés se croisent, et l'arc $d\,k$ ou l'angle D diminue; il est visible que les rayons $S\,I$ et $S'\,I'$ qui se confondent au point d correspondent au maximum de l'angle $S\,D\,O$, et sont à leur émergence parallèles entre eux, tandis que tous les autres rayons émergens sont toujours divergens et ne produisent sur l'œil qu'une sensation trop faible pour être sensible.

On conçoit très bien l'immobilité de l'arc-en-ciel malgré la chute continuelle des gouttes de pluie, puisque les gouttes étant remplacées par d'autres qui occupent les mêmes positions, c'est comme si les premières étaient immobiles.

Application des formules trouvées dans la note ci-jointe.

566. 1° *Deux incidences intérieures* (*fig.* 411) $n=2$.

Rayons rouges. $l=108/81$, $i=59° 23' 30''$.
d'où $r=40° 12' 10''$,
$D=42° 1' 40''$,

Rayons violets. $l=109/81$, $i=58° 49' 30''$,
d'où $r=39° 24' 20''$,
$D=40° 16' 20''$,

2° *Trois incidences intérieures* (*fig.* 412) $n=3$.

Rayons rouges. $l=108/81$, $i=71° 49' 55''$.
d'où $r=45° 26' 50''$,
$D=-50° 58' 50''$,

Rayons violets. $l'=109/81$, $i=71° 26' 10''$,
d'où $r=44° 47' 7''$,
$D=-54 9' 38''$,

Le signe négatif de la valeur de D indique que l'angle a son ouverture tournée en sens opposé, comme le montre la figure.

L'arc produit par deux incidences doit être inférieur, puisque l'angle de déviation est plus petit que celui que l'on produit par trois incidences (*fig.* 409).

L'ordre des couleurs doit être inverse, puisque, pour l'arc inférieur, la déviation des rayons rouges étant moindre que celle des rayons violets, c'est le contraire pour l'arc supérieur.

Dans le troisième arc, l'ordre des couleurs serait le même que dans le premier, et ainsi de suite.

L'effet de ces couleurs est d'autant plus marqué que les gouttes d'eau situées entre les arcs n'envoient, pour ainsi dire, aucune lumière à l'œil.

567. *Largeurs des deux arcs.* La ligne $S\ O\ A$ étant parallèle à la direction des rayons solaires $S\ v$ ou $S\ s'$ (à cause de la distance immense de cet astre), les angles $A\ O\ v$, $A\ O\ r$, sont égaux aux angles $S\ v\ O$ et $S\ r\ O$, comme alternes-internes (*fig.* 409).

La largeur apparente de l'arc intérieur est donc la différence entre les valeurs de l'angle de déviation pour les rayons rouges et violets, c'est-à-dire 1° 46' 20''.

La largeur apparente de l'arc extérieur est 3° 10' 48''.

La distance apparente entre les deux arcs est 8° 57' 10''.

Telles devraient être effectivement les dimensions et les distances des deux arcs si le soleil n'était qu'un point, mais cet astre a un diamètre apparent de 30' environ. Il suit de là que si nous considérons les arcs ci-dessus déterminés, comme produits par les rayons émanés du centre du disque solaire, les rayons émanés des bords ou de l'intérieur formeront autant d'arcs pareils; seulement l'axe de chacun de ces nouveaux arcs sera une ligne menée de l'observateur au point du disque d'où ils seront émanés; en sorte qu'il y aura au-dessus et au-dessous des arcs précédens, des arcs de 15' de largeur. Ainsi la largeur de ces arcs sera augmentée de 30', ce qui portera la largeur de l'arc intérieur à 2° 15' 20''; celle de l'arc extérieur à 3° 40' 48'', et enfin la distance de deux arcs sera réduite à 8° 27' 10'' (1).

La superposition de ces arcs partiels doit rendre les couleurs moins tranchées; en effet elles ne sont jamais bien nettes que sur les bords où il n'y a pas de mélange. Nous ajouterons que ces dimensions déterminées par le calcul sont conformes à celles que donne l'observation.

568. La partie visible de l'arc n'est pas toujours la même. Lorsque le soleil est à l'horizon, l'arc apparaît sous la forme d'un demi-cercle; à mesure que le soleil s'élève, l'axe de la vision, qui est en même temps celui du cône formé par les rayons efficaces, s'abaisse, de sorte que l'arc va en diminuant; enfin l'arc intérieur disparaît quand le soleil est à 42° au-dessus de l'horizon; l'arc extérieur ne cesse d'être visible que quand la hauteur du soleil est de 54°.

Il est encore facile de concevoir qu'un observateur placé sur une éminence, lorsque le soleil est à l'horizon, peut apercevoir même un cercle entier, à l'exception toutefois de la partie cachée par l'éminence.

Sur une mer calme on aperçoit de nouveaux arcs opposés aux arcs directs, produits par la réflexion. On a donné le nom d'arcs surnuméraires aux arcs qui accompagnent quelquefois les arcs ordinaires, quand ceux-ci sont brillans; ce sont des bandes colorées minces, dont la production est attribuée à l'interférence des rayons voisins des rayons efficaces.

DES PRINCIPAUX INSTRUMENS D'OPTIQUE.

569. L'histoire des instrumens ne nous présen-

(1) Soient $s'\ s''$ (*fig.* 407) le diamètre apparent vertical du soleil, $s\ d$ le rayon qui donne le rouge de l'arc intérieur: soit $d\ o$ le rayon émergent. o la position de l'œil; concevons le point s transporté en s''; décrivons un cercle par les trois points i, o, d, et menons $s''\ i\ d'$, l'angle $i\ d''\ o$ sera égal à $i\ d\ o$ et à 42° 9'.

L'angle $i\ d''\ o$ satisfait donc à la condition requise pour que l'œil perçoive les couleurs du point d'.

De plus l'angle $d''\ i\ d$ est égal à $s'\ i\ s$, et conséquemment à 15'. Ainsi la largeur de l'arc sera augmentée de 15' dans le haut; il sera de même augmenté dans sa partie violette de 15' dans le bas; ce qui fait une augmentation totale de 30'.

tera pas de nouveaux principes d'optique; ce ne sera en quelque sorte qu'une application des propriétés des miroirs et des lentilles.

Les principaux instrumens d'optique sont la loupe, ou le microscope simple, le microscope solaire, le mégascope, la chambre noire, le microscope composé, le micromètre, la lunette astronomique, la lunette terrestre, la lunette de Galilée, le télescope de Newton, celui de Gregori, la chambre claire, le goniomètre.

Ces instrumens sont de trois espèces :

Première espèce. Instrumens (*dioptriques*) composés de lentilles.

Deuxième espèce. Instrumens (*catadioptriques*) composés de lentilles et de miroirs.

Troisième espèce. Instrumens (*catoptriques*) fondés sur la seule réflexion de la lumière.

Loupe, ou Microscope simple.

570. Le microscope simple est d'un grand secours au naturaliste. Beaucoup d'objets placés à la distance ordinaire de la vision distincte échapperaient par leur petitesse à l'observateur le plus attentif; la faible lumière qu'ils enverraient, vu leur degré de petitesse, ne produirait pas dans l'œil une impression suffisante. Soit un petit objet *a b* (*fig.* 415); cet objet devrait, pour que la lumière qui en émane pût produire une impression sensible sur la rétine, être placé très près de l'œil; mais alors les rayons lumineux partis de chaque point de cet objet seraient trop divergens, l'image serait tout-à-fait confuse. La présence d'une lentille convergente entre l'objet et l'œil donne aux rayons le degré de divergence qui convient à la vision distincte. De sorte que l'observateur, recevant la lumière sous la même inclinaison sous laquelle elle lui arriverait d'un objet a' b' placé à la distance ordinaire de la vision, croira en effet voir cet objet a' b'. Le microscope simple permet donc de voir les objets placés à une petite distance, et de plus il les agrandit dans le rapport de *a b* à a' b' ou de *o d* à *o D*, c'est-à-dire *sensiblement* dans le rapport de sa distance focale principale à la distance de la vision distincte des objets.

Ceci demande quelques développemens : *o d* est un peu moindre que la distance focale principale. *o D* est aussi un peu moindre que la distance de la vision distincte (22 centimètres), puisque l'œil est placé derrière la lentille (1).

(1) Pour avoir la distance à laquelle l'objet doit être placé, il faut remarquer que cette distance et celle de la vision distincte sont deux foyers conjugués placés du même côté que la lentille, et que conséquemment on aura $\frac{1}{x} - \frac{1}{p} = \frac{1}{f}$, x étant la distance cherchée, p celle de la vision distincte, et f la distance focale principale. (*Voy.* n° 526.)

Ce grossissement doit rester sensiblement le même pour toutes les vues; pour un myope, la distance *o D* est plus petite, mais la distance de l'objet devra diminuer pour que les rayons aient un plus grand degré de divergence. Pour un presbyte, les deux quantités qui forment le rapport augmenteraient.

On se procure bien simplement des microscopes pour les très petits objets; par exemple, en perçant avec une épingle un petit trou dans une feuille mince de métal, et en y introduisant une goutte d'eau, cette goutte prendra, de chaque côté de la surface de la plaque, une convexité sensiblement sphérique. Ces lentilles ont l'inconvénient de se dissiper promptement par l'évaporation. M. Brewster a proposé de substituer à l'eau un vernis transparent. Mais même ce vernis ne se conserve pas sans altération. M. Sivright d'Édimbourg (*An. de Chim. et de Phys.*, t. 11) propose de pratiquer dans les feuilles de platine de l'épaisseur des feuilles ordinaires d'étain, plusieurs ouvertures de 1/20 à 1/10 de pouce de diamètre, de fondre dans chacune de ces ouvertures, à l'aide du chalumeau, un petit globule de verre. On peut remplacer les feuilles de platine par un fil du même métal. Ces petits microscopes sont d'un construction facile, et ne présentent pas l'inconvénient d'une prompte altération.

Au reste, dans l'Optique de Lacaille et dans d'autres ouvrages plus anciens, il est question de microscopes formés par une goutte de liquide introduit dans une ouverture pratiquée dans une lame de métal.

Le microscope employé comme nous venons de l'indiquer agrandit toujours les objets, et les fait voir dans leur position. Si l'on tient la lentille à une certaine distance de l'œil, on voit les objets plus petits et renversés. Dans ce cas, on reçoit dans l'œil les rayons partis de l'image formée entre l'œil et la lentille qui est renversée et en général rapetissée.

Microscope solaire.

571. Le microscope solaire est composé d'un miroir et de deux lentilles convergentes (*fig.* 421).

Le miroir plan métallique *p q* est destiné à réfléchir la lumière solaire sur la première lentille *m n* qui la concentre sur l'objet *a b* placé à son foyer. (Souvent après cette lentille on en ajoute une seconde d'un très court foyer que l'on nomme focus, et qui est destinée à concentrer encore plus les rayons.) L'objet fortement éclairé se trouve en face d'une seconde lentille *S H*, un peu en deçà du foyer principal *F*; les faisceaux divergens partis de l'objet sont concentrés par cette lentille, et donnent sur un carton a' b' convenablement placé une image nette et agrandie de l'objet *a b*; la mobilité du carton permet de le mettre dans la position de la plus grande netteté de l'image. Celle-ci sera d'autant plus grande que l'objet sera plus près du foyer princi-

pal, qu'il ne peut jamais dépasser, puisqu'au delà il n'y aurait pas d'image produite. On est donc le maître de faire varier la grandeur de l'image; l'expérience est piquante lorsque l'objet *a b* est une tranche mince de fromage ou une goutte d'un liquide en putréfaction : on aperçoit alors sur le carton des figures d'animaux qui, par leurs mouvemens et leurs formes bisarres, présentent un spectacle fort curieux. Il faut se rappeler que le miroir plan *p q* et la lentille *m n* sont fixés au volet d'une chambre obscure; le miroir plan doit être mobile, afin qu'on puisse faire arriver la lumière parallèlement à l'axe de la lentille *m n*; il serait encore plus commode de remplacer le miroir par un héliostat. (*Voyez* cet instrument.)

Nous supposons ici l'objet transparent : s'il était opaque, il faudrait l'éclairer de côté. On remplace aujourd'hui avec succès la lumière solaire, par la lumière du chalumeau à gaz hydrogène, qu'on rend très intense, en plaçant dans le jet un morceau de marbre.

Mégascope.

572. Le mégascope ne diffère du microscope solaire qu'en ce qu'il est destiné à l'examen des objets d'assez grandes dimensions, tandis que le microscope sert spécialement à l'étude des objets dont les dimensions sont peu étendues.

Placez en *a b* (*fig.* 416), un peu au delà du foyer principal d'une lentille convergente, un objet renversé, éclairez cet objet par le moyen d'un ou de plusieurs miroirs, disposez dans la chambre obscure un carton ou un verre dépoli, vous verrez l'objet s'y peindre dans sa situation naturelle; vous pourrez agrandir l'image, d'autant plus que vous rapprocherez davantage l'objet *a b* de la lentille, sans toutefois dépasser le foyer principal *F*.

Cet instrument a été proposé par M. Charles; il peut avoir un grossissement de 1 à 20 fois; il est d'une grande utilité dans certaines recherches. C'est à l'aide de cet instrument que M. Chossat a déterminé les courbures des diverses parties de l'œil. On peut l'employer pour dessiner, ou calquer, au moyen de papier végétal, l'image produite sur le verre dépoli.

La lanterne magique diffère peu du mégascope; les objets y sont éclairés par des lampes, et de plus l'ensemble est portatif. La fantasmagorie est une lanterne magique, dans laquelle l'on rapproche ou l'on éloigne l'objet de la lentille convergente, de manière à faire varier la grandeur de l'image; on produit ainsi l'effet du rapprochement ou de l'éloignement. Il faudrait seulement, pour que l'illusion fût complète, que la lumière variât aussi d'intensité.

Chambre obscure.

573. La marche de la lumière dans la chambre obscure est la même que dans les deux instrumens que nous venons de décrire.

Une chambre obscure est formée d'une caisse en bois à laquelle on adapte une lentille convergente (*fig.* 417). Les objets extérieurs viennent se peindre dans le fond de la chambre, dans une position renversée, et sous des dimensions très petites en comparaison des dimensions réelles. Comme cet instrument sert particulièrement à l'art du dessin, on redresse les images en les recevant sur un miroir plan *m n* incliné de 45°. L'image est alors en *a' b'* sur un verre dépoli, de manière qu'un observateur tourné vers l'objet *a b* voit cette image dans une situation droite. Au lieu d'une lentille biconvexe, on peut employer des lentilles concaves vers les objets, et convexes vers l'image. Cette nouvelle forme des lentilles produit des images plus nettes. (Wollaston.)

On donne aussi quelquefois une autre forme à l'instrument (*fig.* 419).

On substitue aussi à la lentille et au miroir un prisme convexe-concave (*fig.* 419 *bis*). La partie convexe est tournée vers les objets, et la partie concave, qui fait un angle droit avec elle, est tournée vers le carton sur lequel va se peindre l'image. La lumière éprouve la réflexion totale sur la face *A B*. La face *A C* détruit une partie de l'effet produit par la face convergente *C B*. Cette disposition paraît avantageuse.

Microscope composé.

574. Le microscope composé (*fig.* 420) est formé d'une première lentille *m n* tournée vers l'objet, appelée lentille objective, ou simplement *objectif*; d'une seconde lentille *P R* placée près de l'œil, et qu'on a nommée, par cette raison, *oculaire*. La plus simple lunette réunit toujours au moins un objectif et un oculaire.

Nous tracerons d'abord la marche de la lumière dans le microscope composé, nous indiquerons ensuite quelques dispositions particulières suggérées par la pratique.

Soit *b' a* un petit objet placé devant la lentille *m n* au delà du foyer des rayons parallèles *F*; cet objet produira une image renversée et agrandie en *a' b'*; mais on l'agrandit encore par le moyen d'un oculaire, qui n'est autre chose qu'une loupe. Le grossissement par l'objectif s'obtient par la proportion

$$a\,b : a'\,b' :: o\,c : c\,o' \text{ ou } a'\,b' = \frac{c\,o' \times a\,b}{c\,o},$$

il sera d'autant plus considérable, que l'objet *b a* sera plus près du foyer *F*. L'image *a' b'* vue à travers l'oculaire sera agrandie dans le rapport de *o' k*, qui est sensiblement la distance focale principale de cet oculaire à *k l*, distance de la vision nette et distincte.

Ainsi il faudra multiplier l'image $a' b'$ par $\frac{k l}{k o'}$ ce qui donnera $a' b' = \frac{o o' \times k l}{o o \times k o'} \times a b$.

Le grossissement est d'autant plus grand que l'objectif et l'oculaire ont une plus courte distance focale; mais ce grossissement a une limite, vu la difficulté de construire régulièrement de très petites lentilles, qui d'ailleurs déforment les objets, et la nécessité de conserver à l'oculaire d'assez grandes dimensions.

Le *champ* du microscope composé, c'est-à-dire l'espace que la vision peut embrasser à travers les lentilles qui composent cet instrument, se trouve borné par les rayons qui rencontrent les bords de l'oculaire.

575. Le microscope dont il est question est généralement composé de trois tuyaux, emboîtés les uns dans les autres (*fig.* 422).

Au tuyau supérieur $A B$ est fixé l'oculaire $P R$, ce premier tuyau s'appelle *porte-oculaire;* il glisse à frottement dans la pièce $C D$; celle-ci peut à son tour glisser dans un tuyau plus large $F H$; au bas de ce dernier est fixé la lentille objective $m n$, Voilà pourquoi on l'appelle *porte-objectif*. On dispose en $I K$ un diaphragme circulaire d'un diamètre connu. On fait mouvoir le porte-oculaire jusqu'à ce qu'on voie avec beaucoup de netteté le diaphragme, qui est alors placé au point où devront être amenées par la réfraction les images des objets qu'on veut observer. Au devant de l'objectif il y a un anneau circulaire; cet anneau est double et reçoit une lame de verre $S T$; c'est sur cette lame de verre qu'on place les objets. La construction de l'instrument permet d'approcher ou d'éloigner l'anneau de l'objectif.

On détermine le grossissement de l'objectif de la manière suivante : On glisse entre les deux parties de l'anneau une lame de verre à divisions très petites; on enfonce la pièce intermédiaire $C D$, jusqu'à ce que la règle de verre soit vue avec netteté; alors l'image est contenue dans le diaphragme $I K$; soit n le nombre de divisions de la règle que l'action de l'objectif rend suffisant pour couvrir le diamètre du diaphragme, soit m le nombre de divisions de la même valeur que renferme réellement ce diamètre, le grossissement sera $\frac{m}{n}$. On pourrait connaître les dimensions absolues d'un objet, en le plaçant sur la règle.

Quant au grossissement de l'oculaire, il se calculera comme nous l'avons indiqué au commencement de cet article. (*Voyez*, à la fin de cet article, un procédé pour mesurer le grossissement de tout l'instrument.)

Il est nécessaire d'éclairer fortement les objets qu'on veut observer; s'ils sont transparens, on les éclaire par-dessous au moyen d'un miroir concave V; s'ils sont opaques, on les éclaire par-dessus. Dans tous les cas, un miroir concave $S S'$, placé au-dessous de la lentille $m n$, et nécessairement percé à son centre, renvoie la lumière sur les objets.

(*Voyez* l'article Télescopes, pour la description d'un microscope catadioptrique.)

576. L'instrument que nous venons de décrire est le plus simple de tous les microscopes composés; mais il présente une grande imperfection, c'est le défaut d'achromatisme de l'objectif. Il en résulte que les images $a' b'$ et $a'' b''$ sont accompagnées de franges irisées, qui rendent les contours des objets très confus. Ce défaut peut être corrigé ou affaibli de plusieurs manières; on le diminue beaucoup en plaçant une lentille $m' n'$ avant l'image $a' b'$ (*fig.* 426). Pour en concevoir l'effet, il suffit de remarquer que lorsqu'un faisceau de lumière blanche tombe sur une lentille, il produit des images colorées et d'inégale grandeur (*fig.* 428 *bis*). L'œil n'apercevrait aucune frange (*fig.* 427 *bis*) si toutes les images avaient des grandeurs proportionnelles à leurs distances à cet organe. Or, le calcul montre que cette condition peut être remplie au moyen d'une ou de plusieurs lentilles, dont les foyers et les distances aux autres lentilles sont déterminés. Cet oculaire achromatique a été imaginé par Campani.

Ramsden y a fait une modification importante; il place la nouvelle lentille au delà de l'image formée par l'objectif. Cette disposition permet de faire mouvoir l'oculaire sans déplacer le micromètre placé au lieu de l'image de l'objectif.

Les microscopes le plus employés sont à trois verres. La *fig.* 426 représente un de ces instrumens.

M. Selligues a soumis à l'Académie des Sciences un microscope dont la lentille objective est composée de quatre lentilles achromatiques à deux verres, et superposées; dans cet instrument les objets sont éclairés par un prisme convexe. M. Chevallier (Vincent aîné) en a présenté un à la Société d'Encouragement, construit suivant les données d'Euler, c'est-à-dire, ayant une lentille achromatique à deux verres et un oculaire à deux verres. Comme il serait difficile, dans les forts grossissemens, de construire des lentilles achromatiques d'un très court foyer, M. Chevallier superpose deux lentilles de quatre lignes de foyer, ce qui équivaut à une lentille de deux lignes de foyer (1). La lumière est réfléchie et concentrée sur l'objet à l'aide d'un prisme de verre ayant une face plane et deux faces convexes. Dans les nouveaux microscopes construits d'après les mêmes principes, les objets sont éclairés par un miroir ou par une lentille.

M. Amici, de Modène, a récemment rendu sen-

(1) Soient deux lentilles O et O' *fig.* 421 *bis*, un rayon $S I$ tombant parallèlement à l'axe commun $A O'$ sur la première lentille $m n$, il irait concourir en F; l'action de la seconde lentille $m' n'$ le porte en F'. Nous

sible le mouvement du suc du chara, à l'aide d'un microscope (*fig.* 426 *bis*) construit par lui, et dont l'objectif était formé par trois lentilles achromatiques composées chacune de trois verres et qui comportait une grande ouverture avec une grande force amplifiante. Les distances focales de ces lentilles varient de 8 à 10^{mm}. Les personnes qui ont vu cet instrument ont avoué ne connaître rien de comparable.

On peut employer une ou deux, ou trois lentilles, suivant le grossissement qu'on veut obtenir. En changeant l'oculaire, M. Amici fait aussi varier le grossissement.

La partie du tube où l'on place l'oculaire contient un large diaphragme noir; l'intérieur du tube est couvert de velours noir. Quand l'objet à examiner est transparent, on le place dans une goutte d'eau entre deux lames de verre C C'. On l'éclaire à l'aide d'un miroir A A' réflecteur. Si l'on emploie la lumière solaire, on place dans le faisceau réfléchi un verre dépoli : un diaphragme E E' mobile permet de faire varier l'étendue du faisceau. Quand le corps est opaque, on le place sur un petit disque de verre noir collé sur une lame de vert transparent. On l'éclaire en dessus à l'aide d'une lentille D D' et du miroir déjà cité. Dans ce dernier cas, on fixe à la lentille objective un miroir concave percé destiné à réfléchir sur l'objet la lumière qui tombe sur sa surface. Un prisme H renvoie la lumière dans l'axe de l'oculaire o o'. Les images sont très nettes, quand le grossissement ne va pas au delà de 500 à 600 fois.

M. Amici a imaginé un moyen très simple pour mesurer le grossissement de son instrument et de tous les microscopes en général; ce moyen consiste à placer avant l'oculaire une lame de verre à faces parallèles, inclinée de 45° sur l'axe de l'oculaire, et à regarder en même temps par réflexion sur la première face de la lame l'image d'un objet, et directement à travers la lame une règle divisée. Le diamètre de l'objet étant, par exemple, de 0^{mm},1, si l'intervalle des divisions est d'un millimètre, et si l'image couvre 10 divisions, le grossissement de l'objectif sera de 100; s'il en couvre 20, le grossissement en diamètre sera de 200; le grossissement en surface serait le carré de ce nombre. Pour avoir le diamètre d'un objet, on estime la longueur qu'occupe le diamètre de l'image, sur la règle dont il vient d'être question, puis on divise cette longueur par le grossissement; il est bien entendu qu'on a déterminé d'avance tous les grossissemens de l'instrument pour les divers objectifs et les divers oculaires dont il peut être composé.

577. M. Brewster a fait servir le microscope composé à la mesure des indices de réfraction d'un grand nombre de substances liquides et de substances à demi solides, comme la cire, etc. Pour mettre ce procédé en pratique, 1° il place en avant de la lentille objective un verre plan très mince, et dispose l'instrument de manière à voir nettement le micromètre; 2° il introduit entre la lentille et le verre plan la substance dont il veut connaître l'indice de réfraction; il presse le verre plan contre la lentille si la substance est solide; les substances qui, comme le caoutchouc, l'asa-fœtida, etc., dans l'état ordinaire, présentent peu de transparence, en acquièrent, étant réduites en lames très minces, une assez grande pour fournir des images parfaitement nettes. L'interposition de la substance augmente nécessairement la distance à laquelle l'image se forme derrière la lentille, en sorte que, si on laisse le micromètre dans le même point, il faut allonger le tuyau du microscope, ou bien, si l'on conserve au microscope sa longueur, il faut augmenter la distance de l'objet. La valeur de cet allongement dépend de la nature de la substance et de la courbure de la lentille. M. Brewster, dans ses expériences, laisse le micromètre dans une position constante, et il ne fait varier que la distance de l'objet.

M. Brewster a mesuré, à l'aide de ce procédé, les indices de réfraction d'un grand nombre de substances. Les valeurs numériques sont rapportées dans son ouvrage, *New. Phil. instrum.*, page 253 (1).

disons dans le texte que $OF' = \frac{1}{2} OF$; en effet on a d'après le n° 526

$$\frac{1}{OF'} - \frac{1}{OF} = \frac{1}{OF}, \text{ d'où l'on tire } OF' = \frac{1}{2} OF.$$

On trouverait de la même manière l'effet produit par une troisième ou une quatrième lentille.

(1) Euler avait déjà songé au moyen de mesurer les puissances réfractives des substances diaphanes fluides, en les renfermant entre deux menisques, et en déterminant la distance focale de la lentille ainsi composée. Le fils de ce célèbre géomètre a mis cette méthode en pratique.

Supposons deux menisques plans concaves, formés chacun avec un liquide particulier. Soient r le rayon de courbure, l et l' les indices de réfraction, f et f' les distances focales principales, on aura (n° 526)

$$f = -\frac{r}{l-1} \text{ et } f' = -\frac{r}{l'-1},$$

$$\text{d'où } \frac{l'-1}{l-1} = \frac{f}{f'} \text{ et } l' = 1 + (l-1)\frac{f}{f'} \quad (1).$$

Ainsi l'indice de réfraction de l'un des deux liquides est exprimé par une relation entre l'indice de réfraction de l'autre liquide et les deux distances focales principales.

Soient a, a', a'' les distances auxquelles l'objet doit être successivement placé pour être vu distinctement à travers l'objectif nu, et garni de menisque formé avec l'un ou l'autre liquide; soient FF F' les distances focales principales de la lentille objective dans ces trois cas; soit D la distance constante de l'image à l'objectif (les formules trouvées plus bas pour les lentilles sim-

M. Cauchois a fait quelques essais avec cet appareil; les résultats qu'il a obtenus ont été assez d'accord avec ceux qu'avaient fournis d'autres procédés.

Le microscope tel que nous l'avons décrit peut servir à la détermination de l'indice de réfraction d'une substance solide diaphane. Il suffira de faire avec cette substance une lentille objective et de placer l'objet à une distance telle que l'image soit nette. Comme l'image se forme dans le diaphragme, on a les deux distances conjuguées, et par la relation (*d*) (note, page 221), on aura *l*.

Pour les substances liquides ou molles, on suit le procédé de M. Brewster.

Lunette astronomique.

578. La lunette astronomique est la plus simple de toutes les lunettes; elle est, comme le microscope composé, formée de deux lentilles (un objectif et un oculaire) (*fig.* 432); mais dans la lunette astronomique l'objectif a un foyer très long; il en a un assez court dans le microscope.

Les astronomes emploient spécialement cette lunette dans leurs observations ordinaires; c'est ce qui lui a fait donner le nom qu'elle porte.

Soit $P\,S$ un objet très éloigné, il ira former une image renversée $S'\,P'$ au foyer principal de la lentille objective A, puisque, vu la grande distance des corps célestes et la petitesse de l'ouverture de la lunette, les rayons lumineux qui partiront d'un même point de l'objet approcheront beaucoup du parallélisme.

L'image $P'\,S'$ se trouve presque au foyer de la lentille oculaire, de sorte que l'œil placé en O au concours des faisceaux $S'\,N$ et $P'\,M$ verra l'astre renversé.

Déterminons maintenant le grossissement ou le rapport entre l'angle sous lequel l'objet est vu à l'œil nu, et l'angle sous lequel on le voit à l'aide de la lunette astronomique.

A l'œil nu, on aperçoit l'objet $S\,P$ sous l'angle $S\,A\,P$ ou son égal $S'\,A\,P'$; par le moyen de la lunette on le voit sous l'angle $N\,O\,M$ ou son égal $S'\,C\,P'$; l'égalité de ces deux derniers angles résulte de ce que l'image $S'\,P'$ est au foyer de la lentille $M\,N$, et de ce que les deux faisceaux $S'\,N$ et $P'\,M$ sont sensiblement parallèles à l'axe. Ces deux faisceaux, après leur passage à travers l'oculaire, iront se croiser au foyer principal; ce qui entraîne l'égalité des deux triangles $C\,S'\,P'$ et $N\,O\,M$, et conséquemment celle des angles $N\,O\,M$ et $S'\,C\,P'$.

Les angles $S'\,C\,Q'$ et $S\,A\,Q'$, moitiés des angles $S'\,A\,P'$ et $S'\,C\,P'$, sont comme leurs tangentes $\frac{S'\,Q'}{A\,Q'}$ et $\frac{S'\,Q'}{C\,Q'}$, ou comme $C\,Q'$ et $A\,Q'$; mais $C\,Q'$ est la distance focale principale de l'oculaire et $A\,Q'$ celle de l'objectif. Ainsi la grandeur de l'objet vu à l'œil nu est à la grandeur de cet objet vu dans la lunette, comme la distance focale de l'oculaire est à la distance focale de l'objectif.

On voit que le grossissement est d'autant plus grand que l'oculaire a une distance focale plus petite; mais ce grossissement a une limite pour plusieurs raisons, et entre autres, parce qu'à mesure qu'il augmente, les images sont moins brillantes.

L'oculaire, étant convenablement placé pour une bonne vue, devra être *rapproché* de l'objet pour une *vue courte*, afin de rendre divergens les rayons qui entraient dans l'œil sensiblement parallèles. Pour une *vue longue*, l'oculaire devra être *éloigné*.

Au foyer de l'objectif on place ordinairement trois ou cinq fils verticaux très fins, d'araignée, d'argent ou de platine, également distans et coupés à leur milieu par un fil horizontal. La plaque de métal qui porte ces fils est mobile, afin qu'on puisse amener le centre des fils dans l'axe optique. Cet appareil est nécessaire aux astronomes pour observer les passages des astres au méridien, quand la lunette est placée dans le méridien même.

Quelquefois on place encore au foyer un fil qui se meut parallèlement au fil horizontal au moyen d'une vis. Cet appareil, que l'on nomme *micromètre*, sert à mesurer par l'écart des deux fils parallèles le diamètre des astres.

Lunette terrestre, ou lunette à quatre verres.

579. La lunette astronomique, faisant voir les

ples, s'appliquent aux lentilles composées) on aura

$$\frac{1}{D}+\frac{1}{a}=\frac{1}{F};\quad \frac{1}{D}+\frac{1}{a'}=\frac{1}{F'};\quad \frac{1}{D}+\frac{1}{a''}=\frac{1}{F''}\ (2).$$

Il faut remarquer que P' étant le foyer principal de la lentille composée (*fig.* 407 *bis*) et P celui de la lentille de verre seule, si l'on plaçait en P' un point lumineux devant le menisque liquide seul, le foyer conjugué de celui-ci serait en P. P et P' sont donc les foyers conjugués par rapport au premier menisque liquide; il en sera de même pour le second liquide. On aura donc

$$\frac{1}{F}-\frac{1}{F'}=\frac{1}{f},\ \text{et}\ \frac{1}{F}-\frac{1}{F''}=\frac{1}{f'}.$$

Si l'on met dans ces équations les valeurs de F, de F' et de F'', tirées des équations (2), on a $\frac{f}{f'}=\left(\frac{a''-a}{a'-a}\right)\frac{a'}{a''}$. cette valeur de $\frac{f}{f'}$ étant portée dans l'équation (1), donne $l=1+(l-1)\left(\frac{a''-a}{a'-a}\right)\frac{a}{a''}$, relation dans laquelle il n'y a que l qui soit inconnu.

objets renversés, est peu employée pour l'observation des objets terrestres.

Pour ce dernier usage, on redresse l'image, en ajoutant deux autres verres (*fig.* 428).

Soit un objet terrestre $S\ P$; il donnera une image renversée $P'\ S'$ que l'œil peut apercevoir en O sous l'angle O ou sous l'angle C, son égal; l'instrument ainsi disposé ne serait que la lunette précédente. On ajoute deux autres lentilles B et E; cette dernière est tellement disposée que le point O en est le foyer; les deux faisceaux lumineux partant du foyer deviendront parallèles à l'axe; mais comme les rayons qui composent chaque faisceau sont parallèles, ils devront sortir convergens, concourir au foyer K et donner une image redressée $P''\ S''$. On regarde cette image avec un oculaire.

Les quatre lentilles sont placées dans un tuyau composé de trois parties mobiles; l'objectif et l'oculaire sont chacun dans un tuyau séparé; les deux lentilles intermédiaires C et E sont liées ensemble dans un même tuyau. L'inspection seule de la figure fait concevoir la nécessité de toutes ces dispositions.

D'abord on voit que la première image doit être placée au foyer de la lentille C, mais cette image étant d'autant plus rapprochée de l'objectif A, que l'objet sera plus éloigné, la lentille C doit être mobile; de plus, comme le point de croisement des faisceaux en O est le foyer commun des lentilles E et C, ces deux lentilles sont nécessairement liées ensemble. Si la distance de la vision distincte était la même chez tous les hommes, l'oculaire pourrait être lié aux deux lentilles C et E; mais la diversité des vues exige qu'on puisse approcher ou éloigner la lentille B de l'image $S''\ P''$.

580. *Grossissement.* A l'œil nu, on verrait l'objet sous l'angle $S\ A\ P$ ou $S'\ A\ P'$; par la seconde lentille, on le voit déjà sous l'angle $V\ O\ U$ ou $S'\ C\ P'$. Le grossissement des deux premières lentilles sera dans le rapport de ces angles; si nous appelons A l'angle $S\ A\ P$, et C l'angle $S'\ C\ P'$ ou son égal $V\ O\ U$, nous aurons, comme dans le numéro précédent, $C = A \times \frac{A\ Q'}{C\ Q'}$; mais $P''\ E\ S''$ est égal à l'angle $N\ O\ M$ ou $V\ O\ U$; et comme, en dernier résultat, c'est sous l'angle D ou sous son égal B qu'on aperçoit l'image, il faut avoir la valeur de ce dernier, ce qu'on obtient par la proportion tang. B : tang. E :: $E\ K$: $B\ K$, d'où tang. $B = \frac{E\ K}{B\ K} +$ tang. E, ou en prenant les angles pour leurs tangentes et remplaçant l'angle E par son égal C, $B = A \times \frac{A\ Q' \times E\ K}{Q'\ C \times B\ K}$. Les distances focales des deux lentilles intermédiaires étant ordinairement égales, cette expression se réduit $A \times \frac{A\ Q'}{B\ K}$; d'où il suit que le grossissement est le même que pour la lunette astronomique. Cette dernière lunette est préférée par les astronomes, 1° parce qu'elle absorbe moins de lumière; 2° parce qu'elle a un plus grand champ; 3° parce qu'elle peut supporter un oculaire d'un plus court foyer.

Lunette de Galilée.

581. La lunette astronomique fait voir les objets renversés, la lunette à quatre verres absorbe une quantité de lumière considérable; de sorte que ni l'une ni l'autre ne sont d'un usage commode pour apercevoir les objets terrestres peu éclairés. Qu'on change la lentille convergente de la lunette astronomique en une lentille divergente, on aura une lunette qui aura le double avantage de n'occasioner qu'une faible perte de lumière, et de faire voir les objets dans leur situation naturelle. Telle est la lunette de Galilée.

Un objet éloigné $P\ S$ (*fig.* 424) ira se peindre en $P'\ S'$; si l'on y place un carton, ou si l'on reçoit cette image sur un oculaire, comme dans la lunette astronomique, on la verra renversée; mais elle sera redressée si avant l'image $P'\ S'$ en B, à une distance $B\ Q'$ égale à la distance focale principale, on fixe une lentille divergente B. Alors chaque faisceau sera dévié et éloigné de l'axe, de sorte qu'il faudra que l'œil soit placé tout près de l'oculaire pour recevoir la lumière. L'objet paraît droit, puisque le point S' est vu en S'' et le point P' en P''.

Le grossissement est le même que dans la lunette astronomique. A l'œil nu on verrait l'objet sous l'angle $P\ A\ S = P'\ A\ S'$; dans la lunette de Galilée on le voit sous l'angle $F\ O\ G = S\ B\ P'$. Or, les deux angles $P'\ A\ S'$ et $S'\ B\ P'$, reposant sur le même côté $S'\ P'$, sont entre eux comme $B'\ Q$ et $A\ Q'$; c'est-à-dire comme la distance focale de l'oculaire et celle de l'objectif. Nous supposons ici que $B\ O$ soit la distance focale principale de l'oculaire. En effet, les deux faisceaux P' et S' étant sensiblement parallèles dans la longueur de la distance $B\ Q'$ le point O est le foyer des rayons parallèles.

Le champ de la lunette de Galilée est déterminé par l'ouverture de la prunelle, il a peu d'étendue: l'œil doit être placé fort près de l'oculaire.

L'oculaire de cette lunette, comme celui de la lunette astronomique, doit être rapproché de l'objectif pour les myopes, et éloigné pour les presbytes.

Galilée a fait avec sa lunette plusieurs découvertes importantes, telles que celles des taches du soleil, des satellites de Jupiter, des phases de Vénus, etc.

Télescopes.

582. Les télescopes sont des instrumens composés de miroirs combinés de manière à produire, par la réflexion de la lumière, des images distinctes; ces images sont vues à travers un oculaire.

Le plus simple des télescopes est celui qui a servi à Herschel à faire toutes ses belles découvertes. Il est formé d'un grand miroir qu'on présente à l'astre dans une position inclinée; l'inclinaison du miroir permet à l'observateur de voir par le moyen d'une loupe l'image produite à côté de l'axe; la perte de lumière est peu considérable; puisque la réflexion n'a lieu que sur un seul miroir, elle est plus grande dans les télescopes suivans, où la lumière est réfléchie deux fois.

583. Newton avait imaginé un télescope peu différent du précédent; seulement l'axe du miroir était dirigé vers l'astre, l'image était réfléchi latéralement par un miroir plan, et vue ensuite à travers une loupe (*fig.* 425).

On peut remplacer le miroir plan par un prisme disposé de manière à produire sur une de ses faces la réflexion totale.

L'image P' S' de l'objet P S placé à une distance infinie, se forme au foyer principal.

Le miroir plan ne fait que changer la direction de la lumière, sans altérer les dimensions de l'image. Pour calculer le grossissement, il suffira de faire remarquer qu'à la vue simple l'astre serait aperçu sous l'angle $P\,C\,S = P'\,C\,S'$, tandis que dans la lunette il est aperçu sous l'angle $m\,o\,n = P''\,K\,S'' = P'\,H\,S'$.

Qu'on suppose, pour plus de simplicité, que la loupe oculaire soit placée en H, ce qui ne change pas le grossissement, on verra que les deux angles $P'\,C\,S'$ et $P'\,H\,S'$ sont entre eux comme les distances focales $R\,H$ et $C\,R$. Ce grossissement est le même que dans le télescope d'Herschel.

584. Gregori avait, quelques années avant Newton, fait connaître un télescope composé de deux miroirs concaves et d'une lentille. Ce télescope fut découvert avant 1663 : Newton ne s'occupa de l'instrument que nous venons de décrire que vers 1666. Voici la description du télescope de Gregori, perfectionné par Jean Halley en 1719.

Dans le télescope de Gregori, les objets sont vus droits, tandis qu'ils sont renversés dans celui de Newton. Le grand miroir $m\,n$ (*fig.* 427) est percé en son milieu d'un trou, dans lequel on fixe l'oculaire. Devant le grand miroir, et au delà de l'image, est placé un second miroir $r\,q$, beaucoup plus petit que le premier, et destiné à redresser l'image. Les rayons réfléchis par le grand miroir $m\,n$ forment une image F' H' renversée; les rayons qui la composent se réfléchissent sur le petit miroir $q\,r$, et donnent en F'' H'' une seconde image, qu'on regarde au moyen de l'oculaire.

La perte de lumière est la même dans le télescope de Gregori que dans celui de Newton.

Les petits télescopes sont rarement employés dans les observations; on leur préfère les lunettes ordinaires. Mais les grands télescopes, conservant beaucoup de lumière, sont employés avec avantage dans l'observation des astres qui ont peu d'éclat; car jusqu'à présent on n'a pu construire des lunettes astronomiques assez grandes pour ces sortes de recherches.

Cassagrain a remplacé le petit miroir concave du télescope de Gregori, par un miroir convexe, afin de compenser les aberrations de sphéricité produites par les deux miroirs. Dans le télescope de Cassagrain (*fig.* 439), la première image ne se forme pas réellement, puisqu'elle doit tomber au delà du petit miroir entre le foyer principal et la surface. On se rappelle que des rayons qui iraient concourir au foyer, seraient parallèles après la réflexion (n° 515). Or, ici les rayons doivent se réfléchir convergens, il faut donc qu'ils aillent concourir avant la réflexion vers un point placé entre le foyer et le miroir.

Le grossissement du télescope de Gregori ne se trouve que par un calcul assez compliqué (1).

(1) *Soient* $A\,B$ l'objet (*fig.* 439 *bis*). C le centre et F le foyer du grand miroir $D\,D'$. e le centre et g le foyer du petit miroir $p\,q$. On fait $C\,F = F$, et $v\,g = f$.

L'objet à l'œil nu serait vu sous l'angle $A\,C\,B$. Désignons cet angle par G. Il est vu, dans le télescope, sous l'angle $o\,l\,o'$, ou sous son égal $m\,l\,i$. Désignons ce dernier par γ. Le grossissement sera $\frac{\gamma}{G}$. Changeons cette expression en une autre, composée de quantités dont les valeurs soient connues par les distances focales des miroirs et la lentille oculaire.

Les triangles $C\,F\,n$ et $F\,e\,n$ donnent les proportions

$$\frac{Fn}{FC} : \frac{Fn}{Fe} :: FC\,n : Fe\,n :: Fe : FC.\ Fe = e$$

$v - v\,F = 2\,v\,g - v\,F$; pour avoir la valeur de $v\,F$, il faut remarquer que le point F, foyer du grand miroir, est entre le centre e et le foyer g du petit miroir. Les rayons partis divergens de l'image $F\,n$ iront former après leur réflexion sur le miroir $p\,q$, une seconde image $i\,m$ sensiblement au foyer de la lentille oculaire. En se rappelant (n° 509) que l'équation des miroirs est $\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{2}{r}$, et en mettant pour p, p', r, leurs valeurs dans la *fig.* 439 *bis*, on a $v\,F = \frac{v\,i \times v\,e}{2\,v\,i - v\,e} = \frac{v\,i \times 2\,v\,g}{2\,v\,i - 2\,v\,g}$. (Si l'on suppose les miroirs tellement placés, que $g\,F = i\,l$. Ce n'est que dans ce cas que $v\,i = v\,g + g\,F + F\,l - l\,i = F + f$). On a $v\,F = \frac{2\,(F+f)\,f}{2\,(F+f) - 2\,f} = \frac{(F+f)\,f}{F}$.

Mettant cette valeur de $v\,F$ dans l'expression précédente, on a $F\,e = 2\,f - \frac{(F+f}{F}\,f = \frac{f\,(F-f)}{F}$.

Microscope catadioptrique.

585. Le nouveau microscope (*fig.* 434) se compose d'un long tube de cuivre de douze pouces environ, tenu dans une position horizontale. A l'une des extrémités A de ce tuyau, se trouve un miroir métallique concave, de forme elliptique. Les foyers de l'ellipse se trouvent l'un à 2 pouces 6/10, l'autre à 12 pouces du centre de la surface du miroir. En E est un petit miroir plan, ovale, formé par la section oblique d'un cylindre métallique du diamètre de 5/10 de pouce. Le milieu de la surface de ce miroir E correspond à l'axe du grand miroir A, et est éloigné de son centre de 1 5/10 pouce. En sorte que $A f' = 12$ pouces, $A f = 2$ pouces 6/10 et $A E = 1$ pouce 5/10. Une petite ouverture F laisse passer la lumière de l'objet O; le miroir plan la réfléchit sur le miroir concave A. A l'aide d'une crémaillère R, on place l'objet au foyer le plus voisin du miroir concave, ou, plus exactement, on donne à la lumière la direction qu'elle aurait si elle partait de ce foyer; en sorte que l'image est formée au second foyer f'. Cette image est vue à l'aide d'un oculaire. On varie le grossissement en changeant l'oculaire.

Le diamètre intérieur du tube étant 1 1/10 pouce, et l'épaisseur du cuivre 1/20 pouce, et le miroir plan E étant à 1 pouce 5/10 du centre du miroir elliptique A, l'objet se trouve éloigné du tube d'un demi-pouce, et peut être très bien éclairé dans toutes ses parties. A cet effet, on a disposé un miroir concave en S pour l'éclairer en dessous, et un autre miroir en V pour l'éclairer au-dessus. Ces deux miroirs sont placés à des distances convenables à l'aide de charnières.

Le grossissement de l'objectif de cet instrument se mesure comme celui du microscope dioptrique, p. 241.

M. Amici regarde son instrument comme supérieur aux meilleurs microscopes dioptriques construits par Adams et Dolland. Il n'a pas eu occasion de le comparer aux microscopes de Utzchneider et de Fraunhofer; mais il annonce que le grossissement de son microscope est d'une million en surface. (Voyez *Ann. de Chim. et de Phys.*, t. 17.)

On trouve décrits, dans les traités d'optique, des microscopes successivement imaginés par Newton, par Smith, par Barker, etc.; nous avons dû nous borner à un seul instrument de ce genre. En général, dit M. Amici dans son mémoire, un télescope, quelle qu'en soit la forme, peut, par un simple renversement, être transformé en un microscope; c'est-à-dire qu'il faut pour cela poser l'objet dans l'endroit où l'on mettait antérieurement l'œil, et transporter réciproquement l'oculaire dans le lieu qu'occupait l'objet.

GÉNÉRALITÉ SUR LES LUNETTES.

586. Nous aurons à nous occuper dans ce chapitre, 1° de l'aberration de sphéricité; 2° de l'aberration de réfrangibilité; 3° des moyens imaginés pour l'achromatisme.

587. *Aberration de sphéricité.* Ce défaut, présenté par tous les instrumens dioptriques, provient de la figure sphérique des verres lenticulaires, qui ne permet qu'aux rayons très voisins de l'axe de concourir sensiblement en un point commun. Les rayons plus éloignés sont plus réfractés, et coupent l'axe en deçà du foyer commun des rayons précédens; il en résulte que le foyer de tous les rayons lumineux émanés de la même partie d'un objet, n'est pas un point unique. De là naît la confusion dans les images.

Pour corriger l'aberration de sphéricité, ou diminuer l'étendue de l'objectif, on place dans l'intérieur des lunettes un *diaphragme* qui arrête tous les rayons qui viennent du bord de l'objectif.

588 *Aberration de réfrangibilité.* Dans l'histoire que nous venons de faire des lentilles et des lunettes, nous avons, pour plus de simplicité, fait abstraction de l'inégale réfrangibilité des rayons. Les images produites par les lentilles qui, dans notre supposition, étaient incolores, sont toujours plus ou moins colorées. Ce défaut est connu sous le nom d'aberration de réfrangibilité. Pour bien concevoir en quoi il consiste, il suffira de faire tomber un rayon $S I$ de lumière solaire sur une lentille $M N$ (*fig.* 433).

Ce rayon de lumière, comme nous l'avons vu n° 540, est l'assemblage de sept rayons principaux; ne considérons que les deux rayons extrêmes, le moins réfrangible (le rouge), et le plus réfrangible (le violet). Le premier suit la direction $I H R$, le second la direction $I K V$, les autres rayons sont intermédiaires. Si l'on substitue un faisceau étendu à ce rayon $S I$, l'image reçue sur un carton blanc sera colorée.

C'est là un défaut capital présenté par les lu-

Ainsi $\frac{f(F-f)}{F} : F :: G : n e F$, ce qui conduit à $n e F = \frac{F^2 G}{f(F-f)}$. Mais les deux triangles $i e m$ et $l i m$ donnent $i l : e i :: m e : m l i$. On bien en mettant la valeur de $m e i = n e F = \frac{F^2 G}{f(F-f)}$, et en représentant la distance focale de la lentille oculaire par φ, et faisant attention que $i e = F l - i l + g F - g e = F l - g e = F - f$, on a $\varphi : F - f :: \frac{F^2 G}{f(F-f)} : \gamma$, d'où $\gamma = \frac{F^2 G}{f \varphi}$, $\frac{\gamma}{G} = \frac{F^2}{f \varphi}$.

Telle est l'expression du grossissement du télescope de Gregori. (Voy. *Lacaille*, p. 128.) Elle serait plus compliquée sans la condition de $g F = i l$. Mais la valeur numérique serait toujours à peu près la même.

nettes. Les lentilles qui ne sont qu'un assemblage de prismes déterminent la décomposition de la lumière envoyée par les objets et donnent naissance à des images altérées par la diffusion des foyers. Au milieu de ces images, la coloration est insensible, parce que la réunion des diverses couleurs reproduit la lumière blanche; mais sur les bords, il se forme des franges irisées qui défigurent tout-à-fait les images.

589. *Lunettes achromatiques.* Dès 1747, Euler, réfléchissant à la structure de l'œil, conçut l'heureuse idée de détruire les franges irisées dont sont entourées les images peintes dans les lunettes. Considérant que les objets que nous regardons à la vue simple, ne sont jamais altérés par les couleurs étrangères, il pensa qu'on pourrait bien corriger l'aberration de réfrangibilité en formant, à l'imitation de l'organe de la vision, des lentilles composées de plusieurs substances (1); et avec sa sagacité ordinaire, il chercha les dimensions qu'il fallait donner aux lentilles pour obtenir l'achromatisme.

D'après Newton il était impossible d'anéantir la diffusion des foyers. « Toutes les fois, dit ce grand physicien, que les rayons de lumière traversent deux milieux contigus, de densités différentes, comme l'eau et le verre, pour revenir ensuite dans l'air, soit que les surfaces soient parallèles entre elles, soit qu'elles soient inclinées, et que cependant la réfraction de l'un détruise la réfraction de l'autre, de manière que les rayons émergens soient parallèles aux rayons incidens, la lumière sort toujours blanche; et si les rayons émergens sont obliques aux rayons incidens, la lumière prend des couleurs. » (*Optice Lucis*, liv. I, part. II.)

C'est cette proposition de Newton qui rendait Dollond si ferme dans la persuasion de l'inutilité de ses recherches pour la construction des lentilles achromatiques. Mais Kligentierna, célèbre professeur de l'université d'Upsal, ne s'en laissa pas imposer par l'autorité du maître; il fit un Mémoire dans lequel il attaqua, par le raisonnement et par la géométrie, la proposition de Newton. Dollond refit l'expérience et la trouva inexacte. Il plaça un prisme solide *A B C* dans un prisme *A B E D* à lames mobiles *A E* et *B D* (*fig.* 423). Il remplit ce dernier de liquide. Il vit que sous certaines positions des lames mobiles, le prisme complexe déviait la lumière sans la colorer d'une manière sensible; qu'un rayon lumineux n'en sortait parallèle à la direction primitive qu'en se colorant : de plus, que le rayon violet était tantôt en haut, tantôt en bas; ainsi l'*achromatisme* était possible.

Dès lors les géomètres les plus distingués se joignirent aux physiciens pour rechercher les courbures les plus convenables à donner aux lentilles.

(1) L'œil ne peut être achromatique, puisque toutes les parties de cet organe réfractent la lumière dans le même sens.

Voici en peu de mots le résultat de leurs recherches :

Pour bien entendre la construction des lentilles achromatiques, il faut d'abord distinguer la *dispersion* de la *réfraction*.

La réfraction des faisceaux lumineux est la déviation qu'éprouve le rayon moyen (le vert).

La dispersion est l'excès de l'indice de réfraction du rayon le plus réfrangible (le violet), sur celui du rayon le moins réfrangible (le rouge).

On appelle pouvoir dispersif, la dispersion divisée par l'indice des rayons jaunes diminués de l'unité. Voici quelques nombres :

	Pouvoir dispersif.	Dispersion.
Sel gemme.	0,053	0,029
Flint-glass.	0,048	0,029
Copal.	0,043	0,024
Diamant.	0,038	0,056
Éther sulfurique.	0,037	0,012
Eau.	0,035	0,012
Verre à vitres.	0,032	0,017
Alcool.	0,029	0,011

Si, comme semblait l'annoncer une expérience de Newton, la dispersion était proportionnelle à la réfraction, la première ne pourrait être détruite sans qu'on anéantît en même temps la seconde, c'est-à-dire qu'il n'y aurait destruction de couleurs que pour des rayons émergens parallèles aux rayons incidens; le concours des rayons vers l'axe des lentilles n'aurait pas lieu, et en conséquence l'impossibilité de former des lentilles achromatiques serait évidente. Mais l'hypothèse d'une dispersion proportionnelle à la réfraction est loin d'être vraie. On trouve bien qu'en général les substances qui réfractent le plus la lumière sont aussi celles qui la dispersent le plus; mais ce cas même offre des exceptions. Ainsi la dispersion de l'essence de térébenthine est plus forte que celle du crownglass, tandis que la réfraction en est moindre.

Le flint-glass (cristal) et le crown-glass (verre ordinaire) ont à peu près le même pouvoir réfractif; la dispersion du premier est plus grande que celle du second. Ces deux verres sont employés depuis Dollond pour la construction des lunettes achromatiques.

590. Cherchons la condition de l'achromatisme d'un double prisme. Soit d'abord un prisme simple *A B C* (*fig.* 326 *bis*); soit y l'angle d'incidence, y' l'angle d'émergence, on aura *P D M* ou l'angle de déviation $=y+y'-a$, a étant l'angle réfringent du prisme. (*Voyez* note, page 224.) Or, on a $\sin. y = l \sin. x$, x étant l'angle de réfraction correspondant à y. Mais comme y et x sont en général petits dans les lentilles, on peut écrire $y=lx$. On aura de même $y'=lx'$. Ainsi la déviation sera $lx+lx'-a$, et par suite $la-a$, ou $a(l-1)$, puisqu'on a $x+x'=a$. Un second prisme placé à côté de celui-ci

produira une déviation égale à $a'(\mathcal{F}-1)$, et comme elle est d'ailleurs en sens contraire, la déviation totale sera $a(l-1)-a'(\mathcal{F}-1)$ (1). Maintenant, pour qu'il n'y ait aucune coloration, il faudra que le rayon rouge et le rayon violet soient parallèles. Or, l étant l'indice de réfraction pour le rayon rouge dans le premier prisme, et $\mathcal{F}$ dans le second; l et $\mathcal{F}$., représentant les indices pour le rayon violet. Il faudra qu'en mettant $l.$ pour l, et $\mathcal{F}.$ pour $\mathcal{F}$, dans l'expression précédente, elle ne varie pas. Ce qui fournira $\frac{l.-l}{\mathcal{F}.-\mathcal{F}}=\frac{a'}{a}$. C'est-à-dire que pour l'achromatisme d'un double prisme, les angles réfringens doivent être en raison inverse des dispersions (2).

591. Soit un double prisme $ABCD$ (*fig.* 435); le prisme ABC, dont l'angle A est plus grand que l'angle C du prisme CAD, est en verre ordinaire; le prisme CAD est en cristal; un rayon SI de lumière solaire, tombant sur la face AB du prisme ABC, sera réfracté et dispersé; les deux rayons extrêmes, le violet et le rouge, sont indiqués par IR et IV; ces deux rayons sont déviés vers la base du prisme; à leur entrée dans le second prisme CAD de cristal dont l'angle est tourné en sens opposé, chaque rayon sera porté vers la base AD; mais comme la réfraction est à peu près proportionnelle à l'angle, il en résulte que le faisceau sera toujours incliné vers la base BC; le prisme CAD, ayant un pouvoir dispersif beaucoup plus grand que celui du prisme ABC, pourra, quoique avec un angle plus petit, reporter vers sa base AD le rayon violet plus que le rayon rouge, de manière que ces deux rayons repassent dans l'air parallèles entre eux et conséquemment dans l'état propre à donner une image incolore. On concevra surtout le parallélisme des rayons si l'on remarque qu'un prisme en cristal d'un angle plus grand que C, rejetterait le rayon violet, vers la base, au delà du rayon rouge. D'après Dollond, un prisme de crown-glass de 30° et un prisme de flint-glass de 19° réfractent assez fortement la lumière sans la colorer. Il sera maintenant aisé de concevoir les lentilles achromatiques. Soient deux lentilles, l'une biconvexe, l'autre biconcave, accolées l'une à l'autre, et ayant le même axe OO' (*fig.* 428). Soit SI un rayon solaire; il sera dispersé dans la première lentille MN biconvexe, de manière à donner sept rayons principaux, dont les deux extrêmes suivent les directions IR et IV. La seconde lentille $MNPQ$, formée de cristal et ayant un plus petit angle, ne pourra pas détruire complètement la réfraction de la première lentille, en sorte que le rayon sera incliné vers l'axe; mais comme le pouvoir dispersif du cristal est beaucoup plus grand que celui du verre ordinaire, le rayon violet sera plus rejeté vers la base MQ que le rayon rouge; d'un autre côté, comme au passage dans l'air la déviation aura lieu en sens opposé, il est possible de donner aux deux lentilles des courbures telles que les rayons se confondent à la sortie de la lentille composée, en conséquence qu'il n'y ait qu'un seul foyer; une lentille construite ainsi donnerait des images incolores (1).

592. En général on ne corrige l'aberration de réfrangibilité que par rapport à l'objectif; on laisse subsister celle qui provient de l'oculaire, parce que le petit intervalle que les rayons qui sortent de ce verre ont à parcourir pour arriver à l'œil, ne leur permet pas de subir une assez grande séparation pour que l'aberration de réfrangibilité qui en résulte ne puisse être tolérée par l'œil.

Le calcul indique qu'il faut employer des prismes dont les angles soient en raison inverse des pouvoirs dispersifs. On satisfait d'abord à cette

(1) La déviation pour un nombre quelconque de prismes est
$D=(l-1)+a'(l-1)+a''(\mathcal{F}''-1)+$, etc.
En donnant le signe + aux angles dans un sens et le signe — aux angles tournés dans un sens contraire, il serait aisé d'après cela d'avoir les angles de trois prismes.

(2) Pour qu'il n'y ait point de déviation il faut qu'on ait $\frac{l-1}{l'-1}=\frac{a'}{a}$.

(1) Soient r et r' les rayons du verre convexe; r' r'' ceux du verre concave; l l'indice de réfraction pour le premier, $\mathcal{F}$ l'indice pour le second.

Un rayon rouge parallèle à l'axe, tombant sur la lentille convexe, donnerait $\frac{1}{OP}=\frac{l-1}{r}+\frac{l-1}{r'}$ (*fig.* 429).

Le foyer de la lentille composée serait en P'; mais les points P' et P pouvant être considérés comme des foyers conjugués, relativement à la lentille biconcave on aura $\frac{1}{O'P'}-\frac{1}{OP}=-\frac{\mathcal{F}-1}{r'}-\frac{\mathcal{F}-1}{r''}$

A cause de la petite épaisseur de la lentille, $O'P'$ est sensiblement égal à OP. Ainsi l'on aura

$$\frac{1}{O'P'}=\frac{l-1}{r}+\frac{l-1}{r'}-\frac{\mathcal{F}-1}{r'}-\frac{\mathcal{F}-1}{r''}\quad(1).$$

Pour un rayon violet on aurait de même

$$\frac{1}{O'P''}=\frac{l.-1}{r}+\frac{l.-1}{r'}-\frac{\mathcal{F}.-1}{r'}-\frac{\mathcal{F}.-1}{r''}$$

Pour que l'achromatisme soit produit, il faut qu'on ait $OP'=OP''$, on (2) $\frac{l-1}{r}+\frac{l-1}{r'}-\frac{\mathcal{F}-1}{r'}$

$$\frac{\mathcal{F}-1}{r''}=\frac{l.-1}{r}+\frac{l.-1}{r'}-\frac{\mathcal{F}.-1}{r'}-\frac{\mathcal{F}.-1}{r''}$$

l, $\mathcal{F}$ $l.$ et $\mathcal{F}.$ étant connus par l'expérience, ainsi que OP' distance focale principale de la lentille composée, on aura deux équations (1) et (2) entre les trois rayons r, r', r'' Le problème de l'achromatisme est donc indéterminé. Comme la sphéricité est un obstacle à la netteté des images, on profite de cette indétermination pour choisir les systèmes qui corrigent le mieux possible l'aberration de sphéricité.

première condition d'une manière approximative, on achève ensuite le travail par tâtonnement.

Si l'on n'emploie que deux prismes et qu'on détruise les couleurs pour les deux rayons extrêmes, on remarque que les couleurs des rayons intermédiaires ne disparaissent pas complètement; ce qui montre que la dispersion des différens rayons ne se fait pas suivant la même loi dans toutes les substances. Car si le quotient $\frac{l. - l}{l'. - l'}$ était constant, l'achromatisme établi pour deux rayons quelconques, le serait pour les autres. Mais en général, l'achromatisme complet n'est pas nécessaire, il suffit d'éviter les franges les plus éclatantes, qui sont les jaunes et les rouges; de sorte que, quoique, d'après le calcul, il faille employer autant de prismes qu'il y a de couleurs différentes, on se borne à l'emploi de deux ou de trois prismes.

Voici la marche générale :

$$D\,r = a\,(l - 1) + a'\,(l' - 1) + a''\,(l' - 1)$$
$$D\,y = a\,(l. - 1) + a'\,(l'. - 1) + a''\,(l''. - 1)$$
$$D\,v = a\,(l. - 1) + a'\,(l'.. - 1) + a''\,(l''.. - 1)$$

étant les déviations pour trois rayons, le rouge, le jaune, et le violet. On écrirait $Dr = Dv$; $Dy = Du$. Ce qui donnerait deux relations entre a a' et a'', qui fournirait deux quelconques des quantités a, a' a'', une d'elles étant connue.

On procéderait de la même manière pour achromatiser un plus grand nombre de prismes.

Il est à remarquer que ces conditions sont tout-à-fait indépendantes de l'angle d'incidence.

Les lentilles achromatiques sont composées d'une lentille biconvexe de crown-glass, et d'une lentille biconcave de flint-glass (*fig.* 428), ou d'une lentille biconcave de flint-glass placée entre deux lentilles biconvexes de crown-glass (*fig.* 428 *ter*).

593. Les procédés que nous avons expliqués précédemment fournissent l'indice de réfraction pour toutes les couleurs et conséquemment la dispersion. Comme ces procédés sont assez compliqués, on a cherché à les éviter. Nous avons vu que la condition de l'achromatisme est $\frac{l. - l}{l'. - l'} = \frac{a'}{a}$, les angles a et a' étant très petits, comme nous l'avons dit; en sorte que si l'on a déterminé la dispersion pour une substance, il suffira, pour avoir celle d'une autre substance, de chercher l'angle sous lequel celle-ci achromatise un prisme d'un angle donné de l'autre substance. Voici un procédé proposé par Rochon pour cela.

On construit deux prismes à angles égaux (ordinairement 5°) avec la substance. Supposons d'abord les deux prismes (*fig.* 410 *bis*) placés de manière que les arêtes correspondantes aux angles réfringens soient en contact. L'angle réfringent du système sera de 10°. Si l'on fait tourner l'un des prismes $ABDE$ sur AE, l'angle réfringent diminuera, et il sera nul après une demi-révolution. Si le prisme continue à tourner dans le même sens, l'angle réfringent du système des deux prismes croîtra depuis 0 jusqu'à 10 degrés. En renfermant ce double prisme dans une boîte munie d'un cercle gradué, on peut connaître dans chaque position l'angle du prisme composé.

Dans l'instrument destiné à mesurer la force dispersive des corps, et qu'on nomme *diasparomètre*, le prisme à angle variable est placé en avant de l'objectif d'une lunette. Devant le prisme, on place un prisme de la substance dont on cherche la dispersion. On fait tourner l'un des verres du prisme composé, jusqu'à ce que les images soient incolores. On trouve par le moyen des triangles sphériques l'angle sous lequel la substance du prisme composé achromatise le prisme de l'autre substance.

Nous indiquerons un second procédé plus simple : soient deux prismes ABC et ACD (*fig.* 412 *bis*); dans l'un des prismes, dans ABC, on creuse une cavité sphérique et l'on introduit un morceau de la même substance terminé par une surface plane HE. Quand cette face est parallèle à AB, un rayon qui traverse le prisme, en passant par la face HE, est dévié comme si ce prisme était resté intact. On incline la face HE, jusqu'à ce que la lumière soit déviée par le double prisme sans être colorée. ACD est donné, l'angle de l'autre sera celui que fait la face mobile HE avec AC.

(*Voyez* dans l'Optique de M. W. Herschel divers autres procédés.)

Nous remarquerons que les fabricans de lentilles achromatiques se bornent à rapprocher des fragmens des substances qu'ils veulent achromatiser; ils estiment ainsi à peu près les angles convenables, puis ils font le reste par tâtonnement.

Instrumens fondés sur la réflexion de la lumière.

594. Les goniomètres (mesure d'angles) sont fréquemment employés à des recherches de physique et de cristallographie; les deux plus simples sont ceux de Malus et de Wollaston.

595. *Goniomètre de Malus.* Le goniomètre de Malus (*fig.* 430) consiste en un cercle horizontal, gradué, sur lequel est placée une alidade mobile autour d'un axe vertical passant par le centre du cercle. On fixe sur l'alidade, avec de la cire, le cristal dont on désire connaître l'angle dièdre. Supposons que cet angle soit celui des faces AB et BC. Il faut d'abord disposer le cristal de manière que l'arête commune BB' soit verticale. On y parvient à l'aide d'une lunette ss fixée au pied même de l'appareil. On place l'instrument devant une fenêtre d'où l'on découvre des objets éloignés verticaux, tels que des cheminées ou des paratonnerres. La verticalité de l'arête BB', commune aux deux faces, sera établie lorsque l'image réflé-

chie sur chacune de ses faces sera verticale, c'est-à-dire lorsqu'elle viendra coïncider avec le fil tendu verticalement dans la lunette. Cette condition étant remplie, on fait tourner l'alidade qui porte le cristal, jusqu'à ce que l'image d'un objet, vue par réflexion sur une des faces de l'angle dièdre, coïncide avec l'entrecroisement des fils de la lunette. On fait de nouveau tourner l'alidade jusqu'à ce qu'on aperçoive l'image du même objet réfléchie sur l'autre face. L'angle dont l'alidade s'est déplacée est précisément le supplément de l'angle dièdre des deux faces.

En effet, $C B A$ (*fig.* 437) étant la projection de l'angle dièdre, la lunette ainsi que l'objet étant immobile, la face $B A'$ est nécessairement parallèle à $B C$, quand le cristal réfléchit l'objet dans la seconde épreuve. L'angle $A B A'$ est donc supplément de $A B C$.

Ce procédé présente un avantage, c'est qu'on peut répéter les mesures, et diviser la valeur totale par le nombre des opérations. On atténue ainsi considérablement l'erreur.

On obtiendrait encore l'angle du cristal en recevant dans la lunette l'image d'un astre réfléchie par chacune des faces; le prisme serait fixe et horizontal ou presque horizontal; la lunette serait mobile, ce procédé serait moins commode.

596. *Goniomètre de Wollaston.* Le goniomètre de Wollaston est destiné à la mesure des angles dièdres des petits cristaux. Cet instrument est formé d'un cercle vertical gradué (*fig.* 436), mobile autour d'un axe horizontal $a\ b$, dans lequel est placé un autre axe horizontal plus petit $c\ d$; l'extrémité saillante de ce petit axe porte plusieurs pièces à mouvemens rectangulaires, sur lesquels on fixe le cristal en h, avec de la cire. Quand on veut prendre la mesure de l'angle d'un cristal, on se place devant un édifice qui présente plusieurs lignes horizontales et parallèles. On dispose l'instrument de manière que le limbe en soit perpendiculaire aux lignes horizontales qui doivent servir de mire, ensuite on fait tourner le petit axe $c\ d$ jusqu'à ce que l'œil, étant placé près du cristal, aperçoive par réflexion une des lignes supérieures et horizontales de l'édifice. On le tourne encore jusqu'à ce que cette image réfléchie coïncide avec une des lignes horizontales vue directement. Si la même condition est remplie sur l'autre face de l'angle dièdre, on peut être bien certain de l'horizontalité parfaite de l'intersection commune des deux faces. Si l'on répète la même opération en partant d'une position déterminée, et en faisant mouvoir le cristal à l'aide du grand axe $a\ b$ auquel sont attachés et le limbe $k\ i$ et le petit axe $c\ d$, il est clair que l'arc parcouru par le limbe sera supplément de l'arc qui mesure l'angle dièdre. On peut d'ailleurs écrire la division tracée sur le limbe de manière qu'elle donne l'angle même. On conçoit qu'il serait utile de recevoir, comme dans le goniomètre de Malus, l'image réfléchie dans une lunette fixe.

597. *Chambre claire* (camera lucida). La chambre claire peut être employée pour le dessin. La partie principale de cet instrument est un prisme quadrangulaire $A\ B\ L\ E$ (*fig.* 438 *bis*). Ce prisme est disposé de telle manière qu'il présente la face $A\ B$ perpendiculairement à la direction des rayons lumineux envoyés par les objets extérieurs. Les rayons, à leur entrée dans la face $A\ B$, n'éprouvent aucune déviation; ils subissent sur les faces inférieures $B\ L$ et $L\ E$ inclinées de 135° deux fois la réflexion totale (1), et arrivent à l'œil de l'observateur placé en O perpendiculairement à leur direction primitive. Cet observateur verra ainsi une image des objets droite et horizontale, qu'il croira voir directement à travers le prisme; et, s'il place son œil de manière que les rayons réfléchis n'occupent que la moitié de la pupille, il pourra voir à la fois l'image et le carton sur lequel elle paraîtra projetée, et en suivre toutes les parties avec un crayon à pointe fine. Si la vue réclame le secours des loupes convergentes ou divergentes, rien ne s'opposera à ce qu'on en fasse usage.

598. M. J. B. Amici, de Modène, a proposé, il y a quelques années, une *camera lucida* dont nous allons indiquer les principes.

Cette nouvelle *camera* se voit dans la *fig.* 447. $A\ B\ E$ est le prisme de verre isocèle, dont la base $A\ B$ fait un angle de 45° avec le verre plan $D\ C$. Les rayons $S\ I$ des objets se réfléchissent d'abord sur la face $A\ B$ du prisme, ensuite sur la face $D\ C$ du verre, et arrivent en O, dans l'œil. M. Amici observe que pour éviter que l'œil n'aperçoive en R, s'il s'avance un peu trop, une image produite par la réflexion intérieure des faces du prisme, il faut faire l'angle E un peu moindre qu'un angle droit, et couvrir la partie supérieure $C\ E$ d'une lame de cuivre percée seulement d'une fente par laquelle on doit regarder. (*Voyez* le mém. orig., *Ann. de Chim. et de Phys.*, t. 22).

A l'aide d'un verre bleu, tourné tantôt vers l'objet, tantôt vers l'image, on obtient une lumière égale et dans l'image et dans le crayon.

Une lentille concave, placée devant le miroir métallique, ou une lentille convexe, placée au-dessous de la lame de verre; donne aux rayons, venus des objets et de la pointe du crayon, la même divergence.

On peut obtenir des dessins de différentes grandeurs, parce que la vision simultanée et suffisamment distincte du crayon et de l'image n'exigent pas un degré de divergence mathématiquement

(1) L'inspection de la *fig.* 431 montre que l'inclinaison des deux faces réfléchissantes $B\ L$ et $L\ E$ est de 135°. En effet l'on a $D\ I\ I' + D\ I\ I' = 180 - I\ D\ I'$; mais $R\ D\ I'$ est droit et $D\ I\ L = L\ I\ I'$ et $D\ I'\ L = L\ I'\ I$; d'où $L\ I\ I' + L\ I'\ I = 45°$, d'où $I\ L\ I' = 135°$.

égal; on est le maître de se servir de lentilles de différens foyers, puisque l'appareil peut être éloigné ou approché de toute espèce d'objet.

Pour avoir un dessin égal à l'objet il n'est besoin d'aucune lentille, l'œil devant se trouver à une égale distance du papier et de l'objet.

Pour avoir un dessin plus grand que l'objet, on place une lentille convergente en avant du miroir, et l'on dispose convenablement la lentille concave au-dessous de la lame de verre.

Le bon effet de cet instrument dépend surtout d'une proportion bien graduée entre la lumière du crayon et celle du papier.

M. Amici a proposé plusieurs autres formes, dans lesquelles le prisme est modifié ou remplacé par un miroir métallique. La figure 441 présente une de ces formes. L'appareil que nous venons de décrire est particulièrement employé. (Voyez *Ann. de Chim. et de Phys.*, t. 23).

Systèmes d'Optique.

599. *Théorie de l'émission.* Newton a imaginé cette théorie pour lier les divers phénomènes de l'optique. Dans cette vue, la lumière serait due à l'émission de particules matérielles. De plus, on serait obligé d'admettre des actions exercées par les corps sur ces particules, actions qui seraient tantôt répulsives (dans le phénomène de la réflexion) et tantôt attractives (dans celui de la réfraction). Le partage de la lumière dans les cristaux biréfringens serait déterminée par des forces repulsives ou attractives selon les cas. Enfin, pour expliquer la décomposition de la lumière, on serait obligé de la considérer comme formée d'une infinité de particules différentes, qui, prises ensemble, constitueraient la blancheur, et qui, prises isolément, produiraient les diverses couleurs.

600. *Théorie des ondulations.* Huygens a fondé le système des ondulations; Grimaldi, Hooke, en ont pressenti l'importance pour les phénomènes de la diffraction; mais après Huygens, c'est surtout aux travaux d'Young et de Fresnel que la science doit le développement de cet ingénieux système.

Dans la théorie des ondulations, les corps lumineux ont leurs particules en vibration, et excitent dans l'*éther* des vibrations analogues; de même qu'un corps élastique et vibrant excite dans l'air des vibrations sonores.

L'éther dans cette hypothèse remplit tous les espaces célestes; il jouit d'une ténuité et d'une élasticité extrêmes; doué d'inertie, il est sans pesanteur; il pénètre tous les corps, et y existe probablement modifié d'une manière particulière pour chacun d'eux.

L'*intensité de la lumière* dépend de l'*intensité des vibrations de l'éther*, et *sa nature*, c'est-à-dire la sensation de la couleur qu'elle produit, dépend de la *durée des oscillations* ou de la *longueur d'ondulation*, qui est toujours proportionnelle à cette durée: de même que l'intensité des sons ne dépend que du plus ou moins d'énergie des oscillations de l'air ou du corps sonore qui met ce fluide en vibration, tandis que la nature des sons est déterminée par la durée de chacune de ces oscillations.

Le mouvement se propage dans l'éther de proche en proche, en vertu des lois dynamiques qui règlent les ondulations des autres milieux élastiques gazeux, liquides ou solides. Ainsi l'expression de la vitesse serait comme par un gaz quelconque, $V=\sqrt{\frac{e}{d}}$.

La vitesse étant immense, il faut que l'élasticité du fluide soit presque infinie relativement à la densité, laquelle est elle-même évidemmenttrès petite.

Les vibrations imprimées à l'éther dans l'espace vide sont propagées à travers les milieux au moyen de l'éther que ceux-ci renferment, mais avec une vitesse moindre. Et même dans le plus grand nombre des corps cristallisés, cette vitesse varie dans les diverses directions.

601. L'ébranlement produit, en un point quelconque, d'un fluide d'une densité et d'une élasticité uniformes, doit se propager dans tous les sens avec la même vitesse. Il suit de là que tous les points ébranlés, au même instant, doivent être sur une surface sphérique, ayant pour centre l'origine de l'ébranlement. Cette surface sphérique est la surface de l'onde.

On appelle *rayons*, les lignes droites menées du centre d'ébranlement aux différens points de cette surface sphérique. Ce sont les directions de la propagation du mouvement.

Le mouvement des particules d'éther ne se produit pas comme dans les vibrations aériennes, dans le sens de la propagation du son, ou en d'autres termes perpendiculairement à la surface de l'onde; il a lieu sur la surface même de l'onde, c'est-à-dire perpendiculairement à la propagation, comme on le remarque dans les ondes à la surface de l'eau.

Les ondes lumineuses, comme les ondes sonores, se superposent sans se nuire.

Une *oscillation lumineuse* se compose de l'allée et du retour. Ainsi une molécule d'éther étant mise en mouvement dans le sens *a b*, l'oscillation est le chemin *a b*, plus le chemin *b a* (*fig.* 462).

On entend par *longueur d'ondulation*, la distance à laquelle le mouvement commence à se faire sentir, à l'instant où la molécule située au centre d'ébranlement est revenue à sa position initiale et recommence une seconde oscillation.

De plus, il résulte de la définition même, que deux molécules situées sur un même rayon lumineux, à une distance l'une de l'autre d'une longueur entière d'ondulation, continueront pendant toute la durée du mouvement à avoir aux mêmes instans des vitesses égales, dirigées dans le même sens. La *fig.* 463

montre les molécules $a\,b$ et $a'\,b'$, distantes d'une ondulation entière. A une distance du centre d'ébranlement égale à la moitié de ce qu'on vient d'appeler longueur d'ondulation, le mouvement oscillatoire commence à se faire sentir à l'instant où la molécule primitivement ébranlée, parvenue à l'extrémité d'une demi-oscillation, revient à sa position primitive par un mouvement en sens contraire. Deux molécules situées sur un rayon lumineux à une distance égale à une demi-ondulation, commenceront et continueront donc à se mouvoir aux mêmes instans avec des vitesses égales, et dirigées en sens contraire.

Pour concevoir ce changement de signe dans la direction, soit $a\,b$ la première molécule ébranlée; elle communiquera son mouvement à la seconde molécule, puis à la troisième, et ainsi de suite. Mais comme la seconde molécule ne sera ébranlée qu'après la première, celle-ci reviendra vers sa position initiale, lorsque l'autre oscillera encore dans le sens primitif $e\,f$ ou $a\,b$. Puisque les molécules successivement ébranlées sont en retard les unes sur les autres, il s'en trouvera une en $a'\,b'$ qui commencera à se mouvoir dans le sens $a'\,b'$, lorsque la première reviendra dans le sens $b\,a$. La distance $C\,H$ est une demi-ondulation.

Les ondes lumineuses se propagent avec *une vitesse uniforme; cette vitesse est le rapport constant de l'espace parcouru au temps employé à le parcourir;* soit donc λ la longueur d'une ondulation lumineuse, t le temps que le mouvement met à se propager d'une extrémité à l'autre de cette ondulation, et qui est conséquemment la durée d'une oscillation lumineuse entière. Soit D la distance de la terre au soleil; T le temps que la lumière emploie à parcourir cette distance; soit enfin A la vitesse de propagation de la lumière, ou aura $A = \frac{D}{T} = \frac{\lambda}{t}$. Mais $D = 35{,}000{,}000$ lieues; $T = 8'\ 13''$; et les expériences de la diffraction ou des anneaux colorés donnent $l = 0^{mm},00055$ pour les rayons jaunes : d'où $t = \frac{\lambda}{D} \times T$; en remplaçant λ, D et T par leurs valeurs, ou aurait t égal à $1/243$ de secondes.

Il ne faut pas confondre *la vitesse absolue* des molécules du fluide avec *la vitesse de la propagation* du mouvement. La *première* varie selon l'amplitude des oscillations d'une égale durée, de plus d'une position à une autre, elle est en raison inverse de la distance de la particule vibrante au centre d'ébranlement; la *seconde*, qui n'est autre chose que la promptitude avec laquelle le mouvement se communique d'une tranche à une autre, est indépendante de l'intensité des vibrations. Tant que l'élasticité et la densité de l'éther ne changent pas, elle conserve la même valeur; elle a pour expression $\sqrt{\frac{e}{d}}$, laquelle est indépendante de l'intensité. C'est pour cela qu'une lumière intense se propage avec la *même rapidité* qu'une lumière faible. De même qu'un son faible se propage aussi rapidement qu'un son fort. L'analogie entre les vibrations aériennes et les vibrations lumineuses est complète. Quant à l'intensité, elle est proportionnelle au carré de la vitesse, et conséquemment réciproque au carré de la distance.

602. *Principe des interférences.* Grimaldi, en 1663, avait remarqué l'influence mutuelle des rayons; Hooke crut voir dans les lignes colorées ou obscures des bulles de savon, un résultat d'interférence; mais le docteur Young est le premier qui ait démontré que, dans certaines circonstances, *de la lumière ajoutée à de la lumière produit de l'obscurité,* et qui ait fait connaître la loi de ce singulier phénomène, auquel il a donné le nom de *phénomène des interférences.*

Cette loi consiste en ce que deux rayons, partis d'une source commune et se rencontrant sous des directions peu inclinées entre elles, se *détruisent mutuellement,* quand il y a entre les longueurs des chemins qu'ils ont parcourus un *nombre impair* de fois la longueur d'une demi-ondulation. Quand la différence de marche, au contraire, est nulle ou contient un certain *nombre pair* de fois cette même longueur, les deux rayons *se renforcent* mutuellement et la lumière résultante est à son *maximum.*

La production de l'obscurité, par l'addition de deux rayons lumineux, est une des plus fortes objections qu'on ait opposées à l'hypothèse de l'émission.

On sent, pour la production du phénomène, la nécessité de faire partir d'une même source les deux systèmes de rayons destinés à le produire; les rayons partis d'un des bords d'un astre n'interfèrent pas avec ceux qui partent du bord opposé. De même un rayon rouge ne détruira pas un rayon violet. Il faut, en un mot, pour que deux rayons puissent interférer qu'ils soient identiques.

On avait admis généralement, jusque dans ces derniers temps, que les oscillations lumineuses se faisaient dans le sens même de la propagation des ondulations, comme cela a lieu dans les ondes sonores. Les expériences de MM. Arago et Fresnel, que nous rapporterons plus loin, ont fait penser que la direction des oscillations est perpendiculaire à la direction suivant laquelle la lumière se propage. Ce qui est d'ailleurs d'accord avec les expériences et les calculs de Fresnel sur la quantité de la lumière réfléchie par une glace non étamée, lorsque le rayon incident est polarisé dans différens sens, et qu'il forme avec la surface réfléchissante des angles différens.

603. Parmi les différentes expériences propres à produire le phénomène des interférences, la suivante, que nous puisons dans un écrit de Fresnel, nous paraît devoir être citée.

On fait tomber sur deux miroirs métalliques, légèrement inclinés entre eux, les rayons divergens qui émanent d'un même point lumineux; les rayons sont réfléchis de manière à produire deux faisceaux qui se rencontrent sous un angle très petit; il résulte de cette légère obliquité, que si une demi-ondulation du premier système coïncide parfaitement en un point avec une demi-ondulation du second qui pousse le fluide dans le même sens, elle s'en sépare à gauche et à droite de ce point d'intersection, et coïncide un peu plus loin, d'un côté, avec la demi-ondulation du mouvement contraire qui précède celle-ci, et de l'autre avec celle qui la suit, puis s'en sépare encore, et, à une distance double de la première, coïncide de nouveau avec deux demi-ondulations, dont les impulsions agissent dans le même sens que la sienne; d'où il résulte, sur la surface de cette onde, une série de lignes également espacées, où son mouvement est alternativement détruit, et renforcé par les ondes de l'autre faisceau; de sorte que si l'on reçoit cette onde lumineuse sur un carton blanc, on doit y apercevoir une suite de bandes alternativement obscures ou brillantes si la lumière est homogène, ou de teintes diverses si l'on emploie la lumière blanche, car les points où les rayons s'accordent ne sont pas les mêmes pour les différentes couleurs.

La *fig.* 464 représente une section de deux miroirs et des ondes réfléchies, faite par un plan mené du point lumineux perpendiculairement à ces miroirs projetés en $E\,D$ et en $D\,F$. Une lentille d'un très court foyer concentre en S un faisceau lumineux homogène et horizontal obtenu par le passage d'un faisceau solaire à travers un verre coloré. A et B représentent les positions géométriques de ses deux images, déterminées, comme il a été indiqué n° 507, en menant des perpendiculaires $S\,B$ et $S\,A$, et prenant $Q\,B = S\,Q$ et $A\,P = S\,P$. En effet, c'est vers A et B, ainsi déterminés, que convergent les rayons réfléchis sur le premier et le second miroir, d'après la loi de la réflexion. Ainsi, pour avoir le rayon réfléchi en un point G quelconque du miroir $D\,F$, il suffit de joindre B et G par une droite, et cette droite prolongée sera le rayon réfléchi. Or, d'après la construction qui nous a donné la position du point B, les distances $S\,G$ et $B\,G$ sont égales; ainsi le chemin total parcouru par le rayon parti du point S, et arrivé en b, est absolument le même que si ce rayon était parti du point B. Cette conséquence s'appliquant à tous les autres rayons réfléchis par le même miroir, ils devront arriver en même temps sur la circonférence $n\,b\,m$ décrite du point B avec $B\,b$ pour rayon. Cette circonférence représentera donc l'intersection de la surface de l'onde réfléchie arrivée en b, et du plan de la figure. Les ondes réfléchies par le miroir $E\,D$ auront leur centre en A.

On a $S\,D = D\,B$ et $S\,D = D\,A$, d'où $D\,A = D\,B$; donc tous les points de la ligne $C\,D\,b$ passant par le milieu de $A\,B$ sont à égale distance des points A et B, puisque deux points de cette ligne jouissent de cette propriété.

Pour figurer les deux systèmes d'ondes réfléchies, on décrit des points A et B, comme centres des arcs de cercle séparés les uns des autres par un intervalle constant et égal à une demi-oscillation. Afin de distinguer les différens mouvemens, on a tracé en lignes pleines les arcs de cercle sur lesquels les molécules éthérées sont supposées animées du maximum de vitesse dans un sens, et l'on a ponctué ceux sur lesquels les molécules éthérées ont le maximum de vitesse dans un sens contraire. D'où il suit que les intersections des arcs de cercle ponctués avec les arcs pleins, sont les points de discordance complète et par conséquent les milieux des bandes obscures; et au contraire les intersections des arcs semblables donnent les points d'accord parfait, ou les milieux des bandes brillantes. Les intersections correspondantes des arcs de même espèce sont jointes par des lignes ponctuées $b\,p$, $b'\,p'$, $b'\,p'$, et les intersections correspondantes des arcs d'espèces contraires le sont par des lignes pleines $n\,o$, $n'\,o'$ à droite et à gauche.

Dans la figure, la longueur réelle des ondes lumineuses, l'inclinaison respective des deux miroirs, sont beaucoup exagérées.

La largeur d'une frange est l'intervalle entre deux bandes obscures ou brillantes consécutives.

La largeur des franges est en raison inverse de la grandeur de l'angle des deux faisceaux interférens, et est égale à la longueur d'ondulation divisée par le sinus de cet angle.

En effet, le triangle $b\,n\,i$, formé par la ligne droite $b\,i$ et par les deux arcs de cercle $n\,i$ et $n\,b$, peut être considéré comme rectiligne et isocèle à cause de la petitesse de ces arcs, et le sinus de l'angle $b\,n\,i$, vu la petitesse de cet angle, est sensiblement égal à $\frac{i\,b}{b\,n}$; donc $b\,n$ est égal à $\frac{i\,b}{\text{sin. } b\,n\,i}$.

Mais l'angle $b\,n\,i$ a ses côtes perpendiculaires à ceux de l'angle $A\,b\,B$, puisque $b\,n$ est perpendiculaire à $A\,b$, et $n\,i$ à $B\,b$; donc ces deux angles sont égaux. Ainsi, en présentant par i l'angle $A\,b\,B$ sous lequel se croisent les rayons réfléchis, on a $b\,n = \frac{i\,b}{\text{sin. } i}$; donc $n\,m$, qui est la largeur d'une frange et qui est sensiblement le double de $b\,n$, sera égal à $\frac{2\,i\,b}{\text{sin. } i}$; $i\,b$ étant la longueur d'une demi-ondulation, d'après la construction de la figure, $2\,i\,b$ est la longueur d'une ondulation entière : donc la *largeur d'une frange* est effectivement *égale à la longueur d'ondulation divisée* par *le sinus de l'angle que font entre eux les rayons réfléchis*, qui est en même temps l'angle sous lequel on verrait l'intervalle $A\,B$ compris entre les deux images du point lumineux, en plaçant son œil en b.

L'expression peut encore s'écrire $d = \lambda \times \frac{A\,b}{A\,B}$ (a), d étant la largeur d'une frange, $A\,B$ la distance des images A et B, et $A\,b$ la distance de ces images au plan dans lequel on mesure les franges.

Il est à remarquer que les deux miroirs doivent être presque dans un même plan, parce que $b\,s$ n'étant que le quart d'un millième de millimètre environ, $b\,n$ ne peut devenir sensible qu'autant que $b\,n$ est très peu incliné sur $s\,n$. Or, l'inclinaison $b\,n\,s$ est égale à $F\,D\,K$ quand $D\,S = D\,b$.

La relation (a) fournit λ, quand on connaît $d\,A\,B$ et $B\,b$. Fresnel déterminait d, en prenant la moyenne de onze franges, dont cinq à gauche et cinq à droite de la frange centrale (du noir au noir). Pour avoir $B\,b$, il mesurait son égale $b\,G + G\,S$. Il obtenait $A\,B$, en plaçant en b une aiguille fine ou un fil métallique. Il recevait à une distance $b\,B'$ les ombres A' et B' dont il mesurait l'intervalle à l'aide de la vis micrométrique : les deux triangles $A\,B\,b$ et $A'\,B'\,b'$ semblables fournissaient $A\,B$.

Cette formule (a) est applicable au cas de deux fentes étroites, illuminées par une même source : la largeur des franges serait égale à la longueur d'ondulation multipliée par la distance des fentes au micromètre, qui sert à ces mesures, divisée par l'intervalle des fentes.

On peut encore l'appliquer aux bandes obscures ou brillantes produites dans l'ombre d'un corps étroit, tant que les franges sont assez éloignées des bords de l'ombre.

Si l'on considère la première frange obscure à droite après la frange centrale, si l'on joint les point A et B au point n, on aura $A\,n - B\,n = \frac{\lambda}{2}$.

De même pour tous les points m... r, de cette frange.

La première frange à gauche fournirait aussi $B\,n - A\,n = \frac{\lambda}{2}$. Donc tous les points des deux branches $o\,n$ sont sur une hyperbole, dont le centre est en C et les foyers en A et en B.

Fresnel a en effet constaté, en prenant l'intervalle entre deux points homologues, des deux branches situées de chaque côté de la bande centrale brillante $b\,p$, à des distances différentes des deux miroirs, que les points successifs de ces bandes sont sur une hyperbole.

On mesure la largeur $n\,n'$ à l'aide d'une vis micrométrique portant une lentille; on amène successivement cette lentille, de manière qu'elle ait à son foyer armé d'un fil, chacune des deux franges consécutives; le chemin parcouru par la lentille est évidemment la largeur cherchée. On le peut encore en recevant les franges sur un verre, sur lequel sont tracées des divisions de 1/50 ou de 1/100 de milli., il est bien entendu qu'on examine encore les franges avec une loupe.

Si l'on couvre un des miroirs, il n'y a plus d'interférence ; on n'aperçoit qu'une teinte uniforme. Si l'on place une lame transparente dans le faisceau de l'un des miroirs, ce faisceau étant retardé, les franges sont déplacées.

604. On détermine de la manière suivante la longueur λ, bien plus facilement que par l'appareil de Fresnel. On place à un demi-mètre de distance d'une petite ouverture S (*fig.* 34, p. 17), une plaque de verre A, en biseau. On observe et l'on mesure les franges en F à l'aide d'une loupe d'un pouce ou d'un demi-pouce de foyer. Ces franges sont produites par les rayons venus de S en F par la partie non prismatique et par ceux qui ont traversé la partie prismatique, si d est la largeur d'une frange, si $S\,S' = c$ et $S\,B = b$. On a comme dans l'expérience des miroirs $\lambda = d \times \frac{c}{b}$.

On mesure b avec une règle divisée; quant à c, on l'obtient par une expérience particulière. On se place devant un rectangle $N\,M$, percé de deux ouvertures, dont la distance horizontale est égale à K. On reçoit à une distance assez grande dans l'œil, un rayon direct $B\,O$ par la partie parallèle, et un rayon $A\,O$ dévié dans le sens $A'\,O$. On s'arrange de manière que l'image A' soit juste au-dessous de B, placé un peu au-dessus de l'horizontale menée de A.

Soit $A\,P = D$ et $A\,S$ de la figure précédente $= l$. On a sensiblement $x : K :: l : d$ d'où $x = \frac{K\,l}{D} = S\,S' = c$.

On entrevoit qu'un grand nombre de phénomènes de lumière, qui se produisent dans l'espace, doivent leur production à l'interférence des rayons réfléchis ou réfractés. (*Voyez* la diffraction.)

De la Réflexion et de la Réfraction.

605. Il nous reste à faire voir comment on peut expliquer la réflexion et la réfraction de la lumière dans l'hypothèse des ondulations. Commençons par la réflexion.

Nous avons vu que la loi de ce phénomène est que l'angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence; il nous faut démontrer qu'il en doit être ainsi, d'après la nature qu'on suppose à la lumière dans le système des ondulations.

Soient $F\,G$ et $D\,E$ (*fig.* 478) deux rayons tombant sur une surface $A\,B$, partis du même centre d'oscillation, que nous supposerons à une distance infinie, en sorte que ces rayons sont parallèles entre eux, et que la surface d'une onde lumineuse est un plan perpendiculaire à la direction du rayon incident. Menons par le point G la ligne droite $G\,I$ perpendiculaire aux rayons $E\,D$ et $F\,G$. $G\,I$ sera la direction de l'onde incidente au moment où elle

rencontrera la surface réfléchissante en G. Nous pouvons considérer chacun des points D et G, où les rayons viennent frapper la surface $A\,B$, comme des centres d'ébranlement qui envoient des rayons dans une infinité de directions, et avec des intensités différentes. Il s'agit de reconnaître ceux qui satisfont à la condition de visibilité, c'est-à-dire ceux qui s'accordent comme les deux rayons $F\,G$ et $E\,D$ s'accordaient avant la réflexion. Ces rayons doivent être évidemment parallèles, et ne pourront être en retard l'un sur l'autre d'aucune fraction d'ondulation.

Considérons donc deux rayons parallèles quelconques $G\,K$ et $D\,L$. Il est clair qu'il faudra que le nombre d'oscillations exécutées par le rayon $F\,G$, en allant de G en C, soit égal au nombre d'oscillations exécutées par le rayon $E\,D$ en allant de I en D : $G\,C$ égale donc $I\,D$; les deux triangles $I\,G\,D$ et $C\,G\,D$, rectangles en I et en C, sont donc égaux : l'égalité de ces deux triangles entraîne celle des angles $C\,G\,D$, $I\,D\,G$ et $F\,G\,A$: donc la condition de l'accord des rayons est la loi connue, c'est-à-dire l'égalité des angles d'incidence et de réflexion, $F\,G\,A$ et $K\,G\,D$.

Il n'en est plus ainsi pour les rayons qui ne font pas l'angle de réflexion égal à l'angle d'incidence. En effet, soient $G\,k$ et $D\,l$ deux rayons parallèles, faisant avec la surface $A\,B$ un angle différent de $E\,D\,A$; alors l'intervalle compris entre le point C et le pied de la perpendiculaire $D\,o$, n'étant plus égal à $I\,D$, les chemins parcourus par les rayons ne sont plus égaux, et les vibrations doivent en être plus ou moins discordantes : or, on peut toujours prendre le point G à une telle distance du point D, que la différence entre $G\,o$ et $I\,D$ soit égale à une demi-ondulation; ce qui établira une discordance complète entre les vibrations réfléchies suivant $G\,k$ et $D\,l$; et, comme elles sont d'ailleurs d'intensité égale, elles se détruiront mutuellement, et par conséquent il n'y aura pas de lumière propagée dans cette direction.

Si réellement le rayon $D\,l$ est neutralisé dans ce cas par le rayon qui vient du point G; on n'a qu'à supprimer ce dernier, le rayon $D\,l$ devra conserver la faculté de paraître; de sorte que les rayons élémentaires réfléchis en G peuvent diverger d'autant plus que la surface est plus rétrécie de chaque côté de ce point. Voici de quelle manière Fresnel soumet à l'épreuve de l'expérience cette conséquence de la théorie. Il fait tomber dans une chambre obscure les rayons d'un point lumineux sur un miroir métallique dont on a recouvert la surface supérieure d'un noir mat, à l'exception d'un espace angulaire un peu long et très étroit. Si l'on reçoit sur un carton blanc la lumière réfléchie, on remarquera que le faisceau réfléchi par la partie voisine du sommet de l'angle, est beaucoup plus large que celui qui vient de la partie opposée; conséquemment la divergence des rayons réfléchis est d'autant plus grande que l'espace réfléchissant est plus étroit.

Cette manière d'envisager la réflexion a encore l'avantage de donner une idée nette de ce qui constitue le poli spéculaire.

606. On explique la loi de la réfraction d'une manière analogue : soit $A\,B$ (*fig.* 472) la surface de séparation des deux milieux; soient $F\,G$ et $E\,D$ les rayons incidens partis d'un point infiniment éloigné, et par conséquent parallèles entre eux. Menons par le point G la ligne $G\,I$ perpendiculaire aux rayons incidens, les mouvemens correspondans des ondulations des deux rayons incidens arriveront simultanément en G et en I; de même si nous considérons les rayons réfractés parallèles $G\,K$ et $D\,L$, partis des points G et D, et si nous menons la perpendiculaire $D\,M$, pour que les deux rayons soient d'accord il faudra que l'intervalle $G\,M$ soit parcouru dans le même temps que l'intervalle $I\,D$. Il est clair qu'il faut pour cela que ces deux espaces soient dans le même rapport que les vitesses de propagation ou les longueurs d'ondulation de la lumière dans les deux milieux; ainsi, en représentant par λ et λ' les longueurs d'ondulation dans le premier et le second milieu, on devra avoir $G\,M : D\,I :: \lambda' : \lambda$, mais $I\,D = G\,D$ sin. $I\,G\,D$ et $G\,M = G\,D$ sin. $G\,D\,M$; or $I\,G\,D$ est égal à $I\,D\,P$, angle d'incidence, et $G\,D\,M$ est égal à $Q\,D\,I$, angle de réfraction, d'où sin. i : sin. r :: $\lambda : \lambda'$; d'où il suit que l'accord des rayons exige que les sinus de l'angle d'incidence et de l'angle de réfraction soient dans le rapport des longueurs des ondulations, c'est-à-dire dans un rapport constant pour le même milieu, ce qui est la loi connue.

On démontrerait, comme dans le cas précédent, que tous les rayons pour lesquels ce rapport n'a pas lieu doivent se détruire.

On tire du calcul précédent que λ' est plus petit que λ, c'est-à-dire que la vitesse de la lumière est plus petite dans les milieux les plus réfringens. Nous verrons plus loin une confirmation expérimentale de cette indication de la théorie des ondes.

Nous avons vu, n° 540, que les rayons des diverses couleurs ne sont pas également réfrangibles; il résulte de là, et de la théorie qui vient d'être exposée, que les ondulations de différentes longueurs ne se propagent pas avec la même vitesse dans le même milieu. Si toutes les couleurs avaient la même vitesse dans le même milieu, il n'y aurait pas de dispersion.

Huygens, et après lui Euler, ont donné des explications des lois de la réflexion et de la réfraction; celles que nous présentons ici sont tirées d'un mémoire de Fresnel (*Ann. de Chim. et de Phys.*, t. 1, p. 275. *Voy.* aussi le même journal, t. 21.)

Il doit être remarqué que le rapport que nous venons de trouver entre les sinus des angles d'incidence et de réfraction est tout-à-fait d'accord avec ce que nous obtiendrons par les anneaux colorés, ce qui montre la généralité de la théorie.

DOUBLE RÉFRACTION.

607. Les corps cristallisés dont la forme primitive n'est ni un cube, ni un de ses dérivés, c'est-à-dire l'octaèdre régulier ou le dodécaèdre à plans rhombes, jouissent de la propriété de partager le rayon réfracté à travers leur substance, en deux parties bien distinctes. Dans les cristaux à un axe, l'une suit sous toutes les incidences et dans tous les plans, la loi connue de la réfraction simple, c'est le *rayon ordinaire;* l'autre partie, appelée *rayon extraordinaire*, suit une marche beaucoup plus compliquée; c'est en cela que consiste le phénomène de la double réfraction. Dans les cristaux qui n'ont pas un axe cristallographique et qui ont alors deux axes optiques, les deux rayons sont extraordinaires. Les liquides et les gaz ne jouissent pas de la double réfraction; les corps solides qui ne la possèdent pas naturellement peuvent l'acquérir accidentellement (*voyez* plus loin *Compression, Trempe*, etc.).

La première observation relative à la double réfraction a été faite par Érasme Bartholin. L'explication de ce nouveau phénomène a exercé la sagacité des savans les plus distingués, à la tête desquels il faut placer Huygens, qui en avait découvert la véritable loi; mais cette loi fut d'abord rejetée sans examen par Newton, parce qu'elle se trouvait liée au système des ondulations. Les travaux de Wollaston en Angleterre, et de Malus en France, ont fixé de nouveau l'attention sur ce singulier phénomène, et ont montré que la construction d'Huygens en est la représentation fidèle. On verra par l'exposé suivant, les découvertes faites depuis Malus par les savans tant français qu'étrangers.

608. Dans les cristaux où les lois de la double réfraction sont les plus simples, il existe toujours une certaine direction autour de laquelle les choses se passent de la même manière de tous côtés. Cette direction est l'*axe* du cristal; ce n'est pas une ligne unique; on peut concevoir dans un cristal autant d'axes qu'il y a de lignes parallèles à cette direction.

Il y a des cristaux où deux directions particulières, plus ou moins inclinées entre elles, présentent des phénomènes analogues à ceux qu'on observe suivant l'axe des cristaux précédens : on les appelle cristaux *à deux axes;* les premiers sont appelés cristaux à un *axe*.

On s'occupera spécialement dans ce qui va suivre des cristaux à un *seul axe*. Dans ces cristaux, l'axe optique ou de double réfraction se confond avec l'axe cristallographique.

Comment trouver l'axe d'un cristal? en le taillant dans différens sens; par exemple : en coupant tous les sommets d'un rhomboïde de spath d'Islande, on reconnaîtrait que l'axe a la direction indiquée, que le quartz, lequel cristallise communément en prismes, a pour axe l'axe même du prisme.

609. C'est dans le spath d'Islande que les phénomènes de la double réfraction ont été observés pour la première fois; c'est aussi une des substances qui les produisent avec le plus d'énergie.

On la trouve sous diverses formes et particulièrement sous celle de rhomboïdes. On peut toujours obtenir cette dernière par le clivage.

On appelle *section principale*, la section faite par un plan mené par l'axe perpendiculairement à une face quelconque du cristal, naturelle ou artificielle. Pour découvrir la section principale, on pose le rhomboïde sur une ligne fine et l'on tourne le cristal jusqu'à ce que les deux images se confondent. La ligne est alors dans la section principale; elle divise ou elle est parallèle à la droite qui divise l'un des angles plans obtus du rhomboïde en deux parties égales.

L'axe de la double réfraction est la ligne qui joint les deux angles tièdres obtus; cette ligne est également inclinée sur les faces du cristal (*fig.* 454).

Pour les rayons incidens perpendiculaires à la face du cristal, la déviation du rayon extraordinaire se fait toujours suivant le plan de la section principale, et cette déviation devient *nulle*, *toutes* les fois que les rayons traversent le cristal parallèlement ou perpendiculairement à l'axe, comme on le verra plus loin.

610. Si l'on place un rhomboïde de spath d'Islande sur une ligne noire, et qu'on le fasse tourner, il y aura une position dans laquelle on n'apercevra qu'une seule image, ce sera celle où l'œil et la ligne seront dans le plan de la section principale.

Si l'on continue à tourner le cristal, la ligne se divise en deux parties, dont l'une, qui est l'image ordinaire, reste immobile, tandis que l'autre, qui est l'image extraordinaire, se meut avec le cristal.

Si l'on substitue un point à la ligne, on voit *deux images* dans toutes les positions; seulement dans celle où la ligne paraît unique, les deux images du point et l'œil sont dans le même point (section principale).

On peut aussi constater l'existence de deux faisceaux, en faisant passer dans une chambre obscure un rayon solaire à travers le cristal; on verra deux images se peindre sur un écran.

611. Si un rayon incident $S\,I$ (*fig.* 448) dans le plan de la section principale, est incliné ou perpendiculaire à la surface, il se divisera en deux rayons $I\,O$ et $I\,E$, qui seront encore contenus dans le plan de la section principale, et qui, parvenus à la face inférieure du rhomboïde, sortiront en $E\,H$ et en $O\,K$ parallèlement au rayon incident.

Si le rayon incident $S\,I$ (*fig.* 449) se trouve dans un plan différent de celui de la section principale, le rayon extraordinaire s'écartera du plan d'incidence; mais les deux rayons émergens n'en seront pas moins parallèles au rayon incident.

On substitue avec avantage aux rhomboïdes des

prismes dont l'arête de l'angle réfringent est parallèle ou perpendiculaire à l'axe. Ces prismes sont achromatisés par du verre. L'achromatisme n'est jamais complet, puisque les deux faisceaux n'ont pas la même réfrangibilité. Nous reviendrons plusieurs fois sur ces prismes.

612. Malus a mesuré l'amplitude $E\ O$ par un moyen fort simple et qu'ont adopté tous les physiciens. Ce moyen consiste à tracer sur une plaque d'ivoire un triangle rectangle $A\ B\ C$ dont le petit côté $A\ B$ soit avec les autres côtés dans un rapport indiqué par la *fig.* 443; il est par exemple un dixième de $B\ C$; les deux côtés $B\ C$ et $A\ C$ sont divisés en parties égales. En regardant le triangle à travers le rhomboïde, on le voit double, et pour chaque position, le côté $A\ C$ de l'image ordinaire est coupé à un certain point I' par le côté $B'\ C'$ de l'image extraordinaire. Au moyen des divisions tracées sur les côtés $A\ C$ et $B\ C$, on connaît la position du point I', et prenant sur $B\ C$ une quantité $I\ C = I'\ C'$ on a deux points I et I', tels que l'image extraordinaire du premier se confond avec l'image ordinaire du second; il suffit de marquer sur la surface supérieure du rhomboïde la position du point où se produit l'image simultanée des deux points I et I' et de prendre l'épaisseur du cristal, pour calculer l'angle compris entre les rayons ordinaires et le rayon extraordinaire.

Comme la lumière suit une marche identique quand elle rebrousse chemin, on aura l'écartement des deux rayons provenant d'un même rayon incident $S\ I$ (*fig.* 448-449).

613. Les deux premières expériences nous ont appris que le rayon extraordinaire est rejeté vers l'angle A, de sorte que les choses se passent comme s'il résidait dans l'axe du cristal une force répulsive, dont l'action s'exerçât sur la partie du rayon incident, qui forme le rayon extraordinaire. Soumettons cette idée à l'épreuve de l'expérience.

Coupons un rhomboïde de spath d'Islande par deux plans perpendiculaires à l'axe $A\ B$, et retranchons les deux pyramides triangulaires (*fig.* 444).

Un rayon incident $S\ I$, perpendiculaire à l'une ou à l'autre des deux faces artificielles du cristal, n'est pas divisé. En effet, dans ce cas, la force répulsive doit être nulle sur un rayon parallèle à l'axe.

Si le rayon incident $S\ I$ est incliné à la face artificielle, la réfraction est double, et l'angle compris entre le rayon ordinaire et le rayon extraordinaire est *constant pour une même inclinaison, quel que soit le plan d'incidence; ce qui n'a lieu que pour les faces perpendiculaires à l'axe.*

Soit encore un cristal taillé en forme de parallélipipède (*fig.* 445), de telle manière que l'arête AA' soit parallèle à l'axe du cristal : quatre faces seront parallèles à cet axe, et deux lui seront perpendiculaires. Un rayon $S\ I$ tombant (*fig.* 446) obliquement sur des faces parallèles à l'axe et dans un plan perpendiculaire à ce même axe, donne deux rayons qui restent dans le plan d'incidence; la déviation du rayon extraordinaire est moindre que celle du rayon ordinaire dans le spath d'Islande ou dans tout autre cristal à axe répulsif. Dans un cristal à axe attractif, dans le cristal de roche, par exemple, ce serait le contraire. Ce cas est celui où les deux rayons s'écartent le plus l'un de l'autre.

Si dans le même plan perpendiculaire à l'axe, on fait varier l'angle d'incidence, on trouve qu'il existe, pour le rayon extraordinaire comme pour le rayon ordinaire, un rapport constant, mais particulier, entre le sinus de l'angle d'incidence et celui de l'angle de réfraction.

Ainsi l'on a toujours $\frac{\sin. i}{\sin. r} = l$ pour le rayon ordinaire, et $\frac{\sin. i}{\sin. r'} = l'$ pour le rayon extraordinaire. On trouve $l >$ ou $< l'$ selon que le cristal est répulsif ou attractif.

On détermine l et l' par les procédés rapportés n° 534. On emploie pour cela un prisme dont les arêtes longitudinales $A\ B$, $C\ D$ et $H\ I$, *fig.* 459, sont parallèles à l'axe $l = 1,654$, et $l' = 1,485$ pour le spath d'Islande (Malus).

On a reconnu que les rayons qui parcourent un cristal parallèlement à l'axe ont la même vitesse, et que les vitesses de propagation présentent la plus grande différence quand les rayons sont perpendiculaires à l'axe. La vitesse des rayons ordinaires est la même dans toutes les directions. Celle des rayons extraordinaires varie au contraire avec l'angle qu'ils font avec l'axe. La différence entre les carrés des vitesses des rayons est proportionnelle au carré du sinus de l'angle que la direction de ceux-ci fait avec l'axe (émission) ou à l'unité divisée par le même carré (ondulation. (Expériences d'Huygens, sur le spath de l'Islande. Expériences de M. Biot sur le cristal de roche).

Dans certains cristaux (carbonate de chaux), les rayons ordinaires sont animés de moins de vitesse, et dans d'autres (cristal de roche) de plus de vitesse, que les rayons extraordinaires (ondes).

Si le plan d'incidence est parallèle à l'axe (*fig.* 453), le rayon ordinaire suit toujours la loi générale; mais le rayon extraordinaire, repoussé par l'axe $A\ A'$, obéit à une loi plus compliquée, qui est tang. $r' = \frac{b}{a}$ tang. r. b étant égal à $\frac{1}{l}$; et a à $\frac{1}{l'}$.

Huygens a donné une construction pour déterminer la marche des deux rayons dans tous les cas. Nous la rapportons ici (1).

(1) 1° *Rayon incident dans un plan perpendiculaire à l'axe.* Soient l l'indice de réfraction pour le rayon ordinaire et l' pour l'extraordinaire, on a $l >$

614. Pendant long-temps on a cru que la propriété de doubler les images, appartenait seulement au spath d'Islande; mais les recherches modernes ont appris qu'elle est le partage d'un grand nombre de substances.

l'; et soit posé $\frac{1}{l} = b$, et $\frac{1}{l'} = a$, on décrit du point d'incidence I (*fig.* 450) comme centre, un cercle $A\,B\,C$ avec b pour rayon. Soient $S\,I$ le rayon incident, $I\,D$ une ligne menée perpendiculairement à ce rayon, $F\,D$ une droite égale à l'unité insérée dans l'angle $F\,I\,D$, et perpendiculaire à $I\,D$, si du point F, où elle coupe le cristal, on mène la tangente $F\,O$ au cercle $A\,B\,C$, le point O correspondra au rayon ordinaire $I\,O$. En effet, les angles $S\,I\,P$ et $F\,I\,D$ étant égaux, ainsi que les angles $N\,I\,O$ et $O\,F\,I$, comme ayant leurs côtés perpendiculaires, on a sin. $S\,I\,P$ = sin. $F\,I\,D = \frac{D,F}{F\,I} = \frac{1}{F\,I}$, et sin. $N\,I\,O$ = sin. $O\,F\,I = \frac{I\,O}{F\,I} = \frac{b}{F\,I}$. De ces deux égalités on tire $\frac{\text{sin. } S\,I\,P}{\text{sin. } N\,I\,O} = \frac{\text{sin. } i}{\text{sin. } r} = \frac{1}{b} = l$. $I\,O$ est donc bien la direction du rayon ordinaire.

La construction qui donne la direction $I\,E$ du rayon extraordinaire est tout-à-fait semblable; il suffit de mener du point F une tangente au cercle $N\,K\,R$, décrit avec un rayon égal à $\frac{1}{l'} = a$.

2° *Rayon incident dans un plan parallèle à l'axe* (*fig.* 453). On a toujours pour le rayon ordinaire $\frac{\text{sin. } i}{\text{sin. } r} = l = \frac{1}{b}$; mais cette constance ne s'observe plus pour le rayon extraordinaire, car ce dernier fournit l'équation tang. $r' = \frac{b}{a}$ tang. r. r' étant l'angle de réfraction du rayon ordinaire et r' celui du rayon extraordinaire, et r' étant plus petit que r (*fig.* 453).

La direction du rayon ordinaire s'obtient comme dans le cas précédent. Pour trouver celle du rayon extraordinaire, on trace du point I une ellipse $A\,N\,A'$ (*fig.* 457), dont le demi-petit axe $I\,A = b$, et le demi-grand axe $I\,N = a$ (*voyez* 1°), puis du point F on mène une tangente $F\,E$, et $I\,E$ est le rayon extraordinaire. En effet, tang. r = tang. $O\,I\,N$ = tang. $I\,O\,Q = \frac{I\,Q}{Q\,O}$, tang. r' = tang. $E\,I\,N$ = tang. $I\,E\,Q = \frac{I\,Q}{Q\,E}$, d'où tang. r : tang. r' :: $Q\,E : Q\,O$; mais, d'après une propriété connue de l'ellipse, $Q\,E : Q\,O :: I\,N : I\,A :: a : b$; donc tang. $r' = \frac{b}{a}$ tang. r

Donc $I\,E$ est la direction du rayon extraordinaire.

Ainsi le rayon ordinaire sera toujours donné par un cercle. L'extraordinaire le sera par un cercle ou par une ellipse, selon que le rayon incident sera dans un plan perpendiculaire ou parallèle à la section principale.

3° Les constructions précédentes ne sont pas applicables dans tous les cas, puisqu'elles supposent les deux rayons dans un même plan.

Voici la construction générale. On mène par le point d'incidence une droite $A\,I\,B$ parallèle à l'axe du cristal (*fig.* 458); sur cette droite, comme axe, on décrit un ellipsoïde dont le demi-axe des pôles $A\,I$ est égal à b, rapport constant pour la réfraction ordinaire, et dont le demi-axe de l'équateur est égal à a, rapport constant de la réfraction extraordinaire. Cet ellipsoïde est aplati, puisque a est plus grand que b.

Par le rayon incident on mène un plan perpendiculaire à la face du cristal; on détermine le point F sur la trace $F\,I\,F'$ de ce plan, comme on l'a fait dans les deux constructions des *fig.* 450 et 457. On tire dans le plan de la face du cristal, qui est celui de l'ellipse $H\,M$, une droite $T\,F\,T'$ perpendiculaire à la trace $F\,I\,F'$; par la droite $T\,F\,T'$, on mène un plan tangent à l'ellipsoïde, et le point de tangence E donne la direction $I\,E$ du rayon extraordinaire.

Si au lieu d'un ellipsoïde on décrit une sphère sur le diamètre $A\,I\,B$, le point O, déterminé par le plan tangent mené à cette sphère par la même ligne $T\,F\,T'$, appartiendra au rayon ordinaire $I\,O$. (*Voyez* Malus, *Double réfraction*, pag. 4, etc.)

Huygens a été conduit à ces constructions par la manière dont il se représentait les phénomènes de la double réfraction. Selon ce grand géomètre, la réfraction ordinaire serait produite par des ondes sphériques, et la réfraction extraordinaire par des ondes elliptiques, excitées dans l'éther qui remplit le cristal.

(1) On avait regardé comme une règle générale, que

On doit à M. Biot la distinction importante des cristaux répulsifs et des cristaux attractifs. M. Brewster a appelé les premiers *négatifs*, et les seconds *positifs*; ces dernières dénominations, qui ne sont liées à aucun système, sont adoptées aujourd'hui.

615. *Cristaux à deux axes.* M. Biot avait annoncé depuis long-temps l'existence de deux axes dans le mica. Wollaston et M. Brewster ont déterminé les premiers avec exactitude la direction et les propriétés de ces axes dans un grand nombre de cristaux, en coupant ceux-ci perpendiculairement à ces axes. Ces deux axes sont en général inclinés également sur les faces correspondantes de cristallisation, et l'angle qu'ils font entre eux varie dans la plupart des cristaux pour les rayons de diverses couleurs. Personne jusqu'ici n'a vu des cristaux à trois axes (1).

Cristaux à un axe.

Négatifs.	Positifs.
Carbonate de chaux.	Quartz.
Tourmaline.	Zircon.
Saphir, Corindon, Rubis.	Sulfate de potasse et de fer.
Émeraude.	Glace.
Nitrate de soude.	
Phosphate de chaux.	
Arséniate de potasse.	
Certains micas.	

616. M. Fresnel a reconnu que dans les cristaux à deux axes, il n'y a pas de *rayon ordinaire* propre-

ment dit, ou, en d'autres termes, qu'aucune portion de la lumière qui les traverse ne s'y *réfracte constamment* suivant la loi de Descartes.

Ce résultat remarquable peut être constaté de deux manières : 1° des prismes d'un même angle, taillés dans une topaze sous divers sens, ne réfractent pas également les rayons ordinaires ; 2° deux lames à faces parallèles et égales en épaisseur, prises dans le même cristal de topaze, mais dans des sens différens, placés de manière à recevoir des rayons qui donnent des franges par leur interférence, déplacent ces franges inégalement. (*Voyez* plus loin la *Diffraction*). Si les pouvoirs réfractifs des deux lames étaient égaux, les franges ne seraient pas inégalement déplacées. (*Ann. de Chim. et de Phys.*, t. 20, p. 338).

Il y a néanmoins deux coupes dans un cristal à deux axes, pour lesquelles la question se simplifie.

Si les lignes $A\,B$ et $A'\,B'$ (*fig* 457 *bis*) représentent les directions des deux axes, la ligne $N\,N$ qui divise l'angle des axes en deux parties égales, est appelée la *ligne moyenne*. Le plan perpendiculaire à cette ligne donne dans le cristal une section pour laquelle l'un des deux rayons suit la loi générale de la réfraction.

On appelle *supplémentaire* la ligne $P\ V$ qui divise en deux parties égales le supplément de l'angle $A\ P\ A'$. Le plan perpendiculaire à cette ligne fournit une section pour laquelle l'*autre* rayon se conforme à la loi générale de la réfraction.

Ces deux coupes fournissent le moyen d'obtenir les indices de réfraction des deux rayons.

Cristaux à deux axes.	Angles des axes.
Carbonate de strontiane	6° 56′
Nitrate de potasse	5° 20′
Hydrate de baryte	13° 18′
Arragonite	18° 18′
Prussiate ferrug. de potasse	17° 24′
Borax	28° 42′
Sulfate de magnésie	37° 24′
Sulfate de baryte	37° 42′
Sulfate d'ammoniaque	49° 42′
Topaze du Brésil	49° 50′ environ.
Sucre	50°
Sulfate de chaux	60°
Feldspath	63°
Carbonate de soude	70°
Acide tartrique	79°
Chlorite de potasse	82°

617. Voici la construction par laquelle Fresnel a représenté la loi générale de la double réfraction des cristaux à deux axes.

Deux rayons, l'un ordinaire, l'autre extraordinaire, se meuvent dans un cristal suivant une direction unique, et l'on veut connaître leurs vitesses.

Pour cela, il faut, dit Fresnel, considérer un point quelconque de cette direction comme le centre d'un ellipsoïde à trois axes inégaux, et mener ensuite par ce centre un plan perpendiculaire à la direction commune des deux rayons ; les moitiés du grand et du petit axe de la section elliptique, faites par le plan, dans la surface, représentent les deux vitesses de propagation, si l'on adopte le système des ondes et l'unité divisée par les mêmes vitesses dans le système de l'émission. Quant aux plans de polarisation des deux faisceaux, ils sont respectivement perpendiculaires aux demi-axes de l'ellipse qui représentent les vitesses. (Voyez le *Mémoire* cité.) (1)

(1) M. Fresnel a exprimé V la vitesse ordinaire et V' la vitesse extraordinaire par les formules.

$$V^2 = U^2 + (U'^2 - U^2)\sin.^2 \tfrac{1}{2}(A' - A) \quad (a).$$
$$V'^2 = U^2 + (U'^2 - U^2)\sin.^2 \tfrac{1}{2}(A + A') \quad (b).$$

A représente l'angle du rayon avec le premier axe ; A' l'angle avec le second axe. U vitesse ordinaire dans les cristaux à un axe, ou vitesse constante dans les cristaux à deux axes, dans une section perpendiculaire à la ligne supplémentaire ; U' vitesse extraordinaire dans les cristaux à un axe, vitesse constante dans la section perpendiculaire à la ligne moyenne.

Dans les cristaux à un axe $A = A'$, elles se réduisent à $V^2 = U^2$, $V'^2 = U^2 + (U'^2 - U^2)\sin.^2 A$.

La vitesse ordinaire V est constante dans toutes les directions. La vitesse extraordinaire dépend de l'angle que fait le rayon avec l'axe. Si $A = 90°$, on a $V' = U'$; ainsi la vitesse extraordinaire est constante. Si $A = O$, c'est-à-dire si le rayon se meut parallèlement à l'axe, il vient $V' = U$; ainsi dans le sens parallèle à l'axe, la vitesse extraordinaire est égale à la vitesse ordinaire.

1 étant la vitesse dans le vide, $\frac{1}{U}$ serait l'indice de réfraction du rayon ordinaire, $\frac{1}{U'}$ serait celui du rayon extraordinaire dans une section perpendiculaire à l'axe, d'où l'on a $\frac{1}{U} > \frac{1}{U'}$ ou $U' > U$ pour les cristaux négatifs, et $U' < U$ pour les positifs (n° 613). Dans les premiers $U'^2 - U^2$ est positif, et le maximum de vitesse a lieu dans une section perpendiculaire à l'axe et le minimum dans le sens de l'axe. C'est le contraire dans les cristaux positifs.

Si, dans les cristaux à deux axes, le rayon est contenu dans la section perpendiculaire à la ligne supplémentaire $V\,V'$ (*fig.* 457 *bis*), A et A' sont égaux, il vient $V = U$. Si l'on suppose le rayon dans la section perpendiculaire à la ligne moyenne $N\,N'$, on a $\sin. \tfrac{1}{2}(A + A') = 1$, d'où $V' = U'$

Si $U > U$, le minimum de la vitesse ordinaire V a lieu pour $A' = A$, c'est $V = U$, et le maximum pour la plus grande valeur de $A' - A$, ce qui doit arriver dans le plan des axes.

les lignes qui divisent en deux parties égales l'angle compris entre les axes optiques, devaient être également inclinées sur les faces correspondantes du cristal ; M. Mitscherlich a reconnu que dans quelques sels, et en particulier dans le sulfate de magnésie, elles s'inclinent plus d'un côté que de l'autre.

618. La lumière par sa réflexion à la première surface des cristaux doués de la double réfraction, ne paraît pas éprouver de modification particulière : la loi est la même que pour toutes les substances. Mais, pour la lumière qui a traversé un cristal de ce genre, et qui éprouve à la seconde surface une réflexion partielle, il n'en est pas ainsi ; chaque faisceau après la réflexion se trouve dans le même cas qu'un faisceau ordinaire ou extraordinaire qui pénètre dans un second cristal. En sorte que les effets dépendent de la position de l'œil, du plan de réflexion et de la section principale. (Voyez plus loin la polarisation par double réfraction.)

619. M. Brewster avait reconnu qu'on peut donner au verre, en le comprimant, la propriété de colorer la lumière polarisée. Il avait même été conduit à avancer que la compression ou la dilatation du verre lui donne la structure des cristaux doublement réfringens.

Fresnel a mis cette double réfraction en évidence, en divisant la lumière en deux faisceaux distincts par une combinaison de prismes de verre comprimés... Il s'est assuré, dans la même expérience, que les deux faisceaux sont polarisés, l'un parallèlement et l'autre perpendiculairement à la direction de la compression, ce qui ne permet pas d'attribuer, dans ce cas, la bifurcation de la lumière à des réfractions multipliées, occasionées par des stries dans le verre. Le verre comprimé se conduit ici comme un cristal dont l'axe coïnciderait avec la direction de la compression, ainsi que l'avait supposé M. Brewster, d'après l'analogie des phénomènes de la polarisation.

Or, comme dans un milieu à un seul axe, la divergence des images est toujours la plus grande, dans le sens perpendiculaire à l'axe (nº 613), on a dirigé la compression, dans l'expérience suivante, perpendiculairement à la marche de la lumière.

La *fig.* 469 donne la disposition des verres dans l'expérience de Fresnel. La double réfraction du verre comprimé même au point d'éclater, étant très faible, un seul prisme n'aurait donné qu'une divergence peu sensible, c'est pourquoi il en a employé quatre marqués A dans la *figure*. Chaque prisme est comprimé à l'aide d'un étau dans le sens de son axe. Pour achromatiser les prismes et supprimer dans la marche de la lumière les déviations inutiles à l'expérience, Fresnel a placé entre eux trois autres prismes renversés B. Les angles réfringens A et B sont de 90°. Aux extrémités de l'appareil sont deux prismes C de 45°, destinés à composer avec les prismes précédens un parallélipipède. Les différens prismes sont collés les uns aux autres avec de l'essence de térébenthine, dont le pouvoir réfringent est peu différent de celui du cristal de Saint-Gobin, qui forme les prismes. Les prismes A dépassent un peu les autres prismes, afin que ceux-ci ne participent pas à la compression des premiers. Un faisceau de lumière, entrant perpendiculairement à la face $m\,n$ de l'un des prismes extrêmes, et sortant par l'autre face $u\,v$, donne deux images qui ne sont écartées, à un mètre de distance, que d'un millimètre et demi, preuve de la faiblesse de la double réfraction du verre comprimé. Une petite mire placée à un mètre est vue double, et l'écart des deux images est d'environ 1 1/2 millimètre. (*Ann. de Chim. et de Phys.*, t. 20, p. 376.)

Cette expérience est propre à montrer que la division du faisceau lumineux, dans les cristaux doublement réfringens, est produite par l'*inégale élasticité* de l'éther dans les différentes directions, et que cette inégalité résulte de la distance relative, de l'arrangement et de la forme des molécules.

Le verre se comporte comme un cristal négatif.

Micromètre à double image.

620. Rochon a imaginé ce micromètre pour mesurer les diamètres apparens des corps célestes, etc.

La partie de cet instrument sur laquelle il faut d'abord fixer son attention est un double prisme rectangulaire $A\,A'\,C\,C'$ (*fig.* 442), formé par la réunion de deux prismes triangulaires $A\,A'\,C$ et $A'\,C\,C'$ de cristal de roche. L'axe du premier cristal est parallèle à $A\,A'$; celui du second est parallèle à l'intersection des deux faces $A'\,C$ et $A'\,C'$. Ils sont réunis par une couche mince de térébenthine.

Si un faisceau $S\,I$ tombe sur ce double prisme, perpendiculairement à la face $A\,C$, il n'éprouvera pas de déviation dans la partie $A\,A'\,C$. Le faisceau ordinaire suivra encore dans le second prisme son chemin en ligne droite, puisqu'il ne change pas de milieu ; car la couche de térébenthine n'exerce aucune influence sur la direction du faisceau. Le faisceau extraordinaire suit la loi de Descartes dans le second cristal, nº 613.

Si le cristal est attractif (cristal de roche), le faisceau extraordinaire est rejeté vers la base $C\,C$ dans la direction $I'\,U$, *fig.* 442, et vers le sommet A', si le cristal est répulsif (spath d'Islande), *fig.* 452.

L'angle de déviation $E\,U\,R$ du rayon extraordinaire dépend de l'angle réfringent des prismes : $C\,A'\,C = A\,C\,A' = L\,I'\,I = b$ et $Z\,U\,I' = U\,I\,V - O\,I'\,V$ ou $U\,I'\,V - b$ (*fig.* 452), cristal répulsif (spath d'Islande).

Si $U' < U$, le minimum devient le maximum et réciproquement.

Des considérations analogues s'appliquent au rayon extraordinaire.

Si l'on retranche l'équation (a) de l'équation (b), et si l'on change $2 \sin. \frac{1}{2} a \cos. \frac{1}{2} a$ en $\sin. a$, il vient $V'^2 - V^2 = (U'^2 - U^2) \sin. A \sin. A'$, ce qui exprime que la différence entre les carrés de la vitesse du rayon ordinaire et de celle du rayon extraordinaire est proportionnelle au produit des sinus des angles que chacun de ces rayons fait avec les axes ; relation indiquée depuis long-temps par M. Biot et M. Brewster.

On a $Z\,U\,\Gamma = O\,\Gamma\,V - U\,\Gamma\,V = a - U\,\Gamma\,V$ (*f.* 442), cristal attractif (cristal de roche).

Dans le cristal de roche, l'indice de réfraction est égal à 1,5484 pour le rayon ordinaire, et à 1,5582 pour le rayon extraordinaire dans un plan perpendiculaire à l'axe.

Ainsi $\frac{\sin. L\,\Gamma\,I}{\sin. U\,\Gamma\,V} = \frac{1,5582}{1,5484} = 1,006 = \frac{\sin. b}{\sin. U\,\Gamma\,V}$ et $\frac{\sin. E\,U\,R}{\sin. Z\,U\,\Gamma} = 1,5583$. On tire de là $U\,\Gamma\,V$, puis $Z\,U\,\Gamma$, et par suite $E\,U\,R$ quand l'angle des prismes est connu. Si l'on fait successivement b égal à 30° et à 60°, on trouve les déviations 19′ 1/2 et 57′ 2/3. D'où l'on voit qu'avec un prisme d'un angle réfringent égal à 60°, on ne peut mesurer des angles plus grands que 1°.

Soit maintenant placé un semblable prisme dans une lunette astronomique, dont $A\,B$ (*fig.* 456) est l'objectif; soit un objet quelconque très éloigné, l'image renversée de cet objet sera produite au foyer en $F\,H$; supposons le double prisme tellement placé que les deux images soient tangentes l'une à l'autre comme l'indique la figure.

Si le double prisme était plus rapproché de l'objectif, les deux images $H\,F$ et $H'\,F'$ (*fig.* 477) seraient séparées. Enfin, s'il était éloigné de manière à placer les points a et a' au foyer, l'on n'apercevrait plus qu'une seule image.

Si f représente la distance focale $O\,H$, V l'angle sous lequel on aperçoit l'objet, on aura tang. $V = \frac{H\,F}{f}$; mais, en appelant a l'angle constant $H\,a\,F$, et D la distance $H\,a$, on a également $\frac{H\,F}{D} =$ tang. a. Égalant la valeur de $H\,F$, tirée de chaque équation, on a tang. $V = \frac{\text{tang.}\,a}{f}\,D$ (1).

$\frac{\text{tang.}\,a}{f}$ est une quantité constante pour une même lunette. La détermination s'en obtient de plusieurs manières. a est connu par le prisme, c'est l'angle $E\,U\,R$. On détermine f par une expérience directe. On a donc $\frac{\text{tang.}\,a}{f}$; ordinairement on suit une autre marche.

Soit un objet $C\,R$ (*fig.* 455) d'un rayon connu R, et placé à une distance connue L, V l'angle sous lequel on l'aperçoit; on aura sin. 1/2 $V = \frac{R}{L}$, d'où l'on tire tang. V.

Pour avoir D, on place le double prisme d'abord au foyer, et ensuite dans une position propre à mettre les deux images en contact. Une division tracée sur le tuyau de la lunette donne le chemin parcouru par le prisme; une fente longitudinale permet le déplacement (*fig.* 461).

Les deux quantités V et D doivent satisfaire à la relation ci-dessus : c'est-à-dire qu'on doit avoir tang. $V = \frac{\text{tang.}\,a}{f}\,D$, d'où $\frac{\text{tang.}\,V}{D} = \frac{\text{tang.}\,a}{f}$; V et D sont connus en nombres, $\frac{\text{tang.}\,a}{f}$ sera également connu.

Il ne restera donc, dans chaque observation, à trouver que la quantité D pour avoir la grandeur apparente d'un astre ou d'un objet quelconque éloigné, puisque tout sera connu dans l'équation (1), à l'exception de V, qui s'en déduira.

Au delà du prisme se trouve l'oculaire comme dans la lunette astronomique ordinaire. Nous n'en avons pas parlé dans ce qui précède, parce qu'il ne sert qu'à agrandir les images, et que sa présence ne peut faire modifier nos raisonnemens.

621. Il est facile de se dispenser de la détermination de $\frac{\text{tang.}\,a}{f}$. Supposons qu'on ait à sa disposition une lunette astronomique munie d'un double prisme, et qu'on veuille, sans connaître l'angle de déviation, employer cette lunette à la mesure des petits diamètres, on choisira une mire dont on aura pris la grandeur et la distance, et dont on connaîtra conséquemment la grandeur apparente; on amènera le double prisme au foyer, afin d'avoir une image simple. Ce point sera le zéro de l'échelle tracée sur le tuyau; il correspond au foyer de la lunette. On fera mouvoir le double prisme jusqu'à ce que les deux images soient amenées en contact. Supposons par exemple que l'objet soit vu sous un angle de 60′, on divisera l'intervalle entre la position précédente, et celle-ci en 60 parties. Chaque partie vaudra une minute. On pourra vérifier les parties de l'échelle avec des disques différens. Maintenant qu'on dirige la lunette sur un objet d'un diamètre inconnu. Supposons que pour le contact des images, le prisme soit à la trentième partie de l'échelle, le diamètre apparent de l'objet sera de 30′.

On a gravé sur le tuyau une série de nombres dont chacun correspond à l'un des angles précédens. On les obtient en divisant l'unité par la tangente de l'angle correspondant (1). En multipliant la grandeur connue d'un objet par le nombre correspondant, on a la distance de cet objet. 3438 se trouve à côté de 1′, 1719 à côté de 2′, 1146 à côté de 3′, etc. Supposons qu'en observant un objet de cinq

(1) Tang. $= \frac{\text{grandeur}}{\text{distance}}$, d'où distance $=$ grandeur $\times \frac{1}{\text{tang.}}$

pieds, on doive, pour produire le contact des deux images, amener le double prisme au point marqué 3′ sur le tube, en multipliant 5 par 1146, écrit à côté de 3′, on aura 5730 pieds, qui sera la distance cherchée.

La lunette de Rochon peut faire apprécier la distance des objets dont on connaît la grandeur, sans que pour cela on soit obligé de tracer les divisions dont il vient d'être question. On cherche d'abord la grandeur apparente à l'aide de la lunette, et si 2 R est la grandeur réelle, on aura la distance L par l'équation, sin. 1/2 $V = \frac{R}{L}$. C'est ainsi qu'on peut estimer la distance à laquelle on se trouve d'une armée.

Le micromètre tel que Rochon l'a construit présente plusieurs inconvéniens : le premier consiste en ce que le double prisme, dans son mouvement, peut s'incliner à l'axe de la lunette ; le second est la production des couleurs dans l'image extraordinaire. C'est ce dernier défaut qui a empêché Rochon de faire servir son instrument à la détermination du diamètre du soleil et du diamètre de la lune : car le défaut d'achromatisme est d'autant plus sensible que le double prisme est plus loin du foyer.

622. Le micromètre proposé par M. Arago est exempt des deux défauts que nous venons de signaler dans le micromètre de Rochon. M. Arago place le double prisme de cristal de roche hors de la lunette et contre l'oculaire.

Si l'on reçoit dans une lunette ordinaire la lumière envoyée par un disque d (*fig.* 460), on aura au foyer une seule image s ; si l'on regarde cette image avec un double prisme p, on aura au foyer deux images s et s' séparées l'une de l'autre par un intervalle égal à l'angle constant $s\,p\,s'$ du prisme. Concevons maintenant un oculaire placé entre le double prisme et la double image, celle-ci sera plus ou moins amplifiée ; et si cet oculaire est composé de deux loupes mobiles, on pourra faire marcher l'une d'elles jusqu'à ce que le grossissement soit tel que les deux images paraissent en contact. Désignons par A l'angle de bifurcation du prisme, par D le diamètre apparent de l'objet, et par G le grossissement de l'oculaire, on aura $A = G \times D$; de cette relation on tirera $D = \frac{A}{G}$, et ainsi, lorsqu'on aura mesuré l'angle de bifurcation A du prisme, et qu'on connaîtra le grossissement G, on pourra toujours déterminer le diamètre apparent D de l'objet. Quant aux différens grossissemens de l'oculaire composé, on les obtiendra en observant des disques d'un diamètre connu, et on les marquera sur le tuyau de l'oculaire.

623. *Mesure du grossissement dans les instrumens d'optique.* Rappelons-nous d'abord que le grossissement dans les instrumens destinés à voir les objets éloignés, est le rapport des angles sous lesquels le même objet est vu à l'œil nu et à travers la lunette.

M. Arago mesure ce grossissement au moyen du double prisme dont nous venons de parler. Il le place contre l'oculaire de la lunette dont il veut connaître le grossissement. Il regarde alors un disque, qu'on éloigne ou approche jusqu'à ce que les deux images qu'on voit au foyer soient en contact. Connaissant la grandeur et la distance du disque à la lunette, on aura le diamètre D sous lequel il est vu. Soit donc G le grossissement de la lunette, on aura, d'après ce que nous venons de dire pour le micromètre, $A = G\,D$, d'où l'on tire $G = \frac{A}{D}$. Ce procédé est aussi applicable au microscope composé.

Pour connaître l'angle A de bifurcation du double prisme, M. Arago regarde à travers le prisme seul, à la vue simple, une mire d'un diamètre connu, placée à une distance connue, et, à cet effet, il s'éloigne ou s'approche jusqu'à ce que les deux images soient en contact. A est ainsi connu, puisqu'on a tang. $A = \frac{D}{L}$, D étant le diamètre, et L la distance de l'objet.

De la Polarisation de la Lumière.

624. La lumière acquiert, soit par sa réflexion sous certaines incidences sur les surfaces polies non métalliques (1), soit par sa transmission à travers les lames douées ou non douées de la double réfraction, des propriétés singulières, par exemple celle de ne plus être réfléchie ni transmise par le verre, ou de ne pas donner deux images par son passage à travers des cristaux doués de la double réfraction, dans certaines conditions.

625. *Polarisation par réflexion.* Si l'on reçoit sur une glace $C\,D$ (*fig.* 466) un faisceau déjà réfléchi par une première glace $A\,B$, sous l'angle de 35° 25′, compté de la surface, et qu'on dispose la seconde de manière que l'incidence s'y fasse sous le même angle que sur la première, voici ce qu'on remarque en faisant tourner la glace $C\,D$ de manière qu'elle reçoive toujours le faisceau lumineux sous un angle de 35° 25′ : quand les *deux réflexions* se font dans *un même plan*, l'intensité de la lumière réfléchie est à son maximum ; quand le deuxième plan est dirigé *perpendiculairement* au premier, il n'y a plus du tout de lumière réfléchie. Il y a donc deux positions où la lumière réfléchie est à son maximum, et deux autres où elle disparaît en totalité (2). On appelle plan de polarisa-

(1) Dont l'indice est $< 1,7$.
(2) Malus a proposé la formule $J = a \cos.^2 d$ pour représenter l'intensité de la lumière dans ces différens

tion, le plan de réflexion dans lequel la lumière a été polarisée.

L'appareil *fig.* 473 est commode pour ces expériences. Il se compose d'un tuyau en cuivre mobile sur une charnière C, et portant à chacune de ses extrémités une glace dépolie et noircie sur une de ses faces; des cercles divisés m et n indiquent l'angle des deux glaces; deux autres cercles A et B font connaître l'angle de chaque glace avec l'axe du tuyau, et conséquemment avec le faisceau lumineux qui lui est parallèle.

Le rayon polarisé ne donne *qu'une image* par son passage à travers un rhomboïde de spath d'Islande, dont la section est parallèle ou perpendiculaire au plan de réflexion.

De plus, ce rayon, reçu perpendiculairement sur une plaque de tourmaline, ne se transmet point si l'axe de cette plaque est *parallèle* au plan de réflexion. Il se transmet au contraire en quantité d'autant plus grande, que cet axe approche plus d'être *perpendiculaire* au plan dont il s'agit.

Un rayon de lumière émané directement du soleil donnerait deux images à travers le rhomboïde, passerait à travers la tourmaline, et se réfléchirait sur la lame de verre.

Ainsi *trois propriétés principales* caractérisent la lumière polarisée par réflexion.

Les phénomènes de la polarisation par réflexion ont été observés pour la première fois par Malus, en 1808.

626. Lorsqu'un faisceau de lumière tombe sur la première surface d'une lame diaphane à faces parallèles, sous un angle propre à la polarisation complète, le faisceau réfracté arrive aussi sur la seconde surface sous un angle propre à la polarisation complète, ce qui montre que *le sinus de l'angle de polarisation sur la première surface est au sinus de l'angle de polarisation sur la seconde dans le rapport du sinus de l'angle d'incidence au sinus de l'angle de réfraction* (les angles étant comptés de la normale). (*Malus*, p. 225.)

Pour constater cette loi, il faut, comme Malus, prendre une plaque de verre de forme trapézoïdale $ABCD$ (*fig.* 467), ayant l'angle D de 32° 54, et faire arriver un faisceau SI sur la face AB sous un angle SIA de 35° 25; une partie de ce faisceau se réfléchit suivant IS' dans un état complet de polarisation. La partie réfractée tombe sur la face CD sous un angle $II'C$ égal à $I''I'D$. Mais l'indice de réfraction du verre employé étant de 1,5, on a $\cos. II'C = \frac{\cos. SIA}{1,5}$. Ce qui donne 57° 6' pour $II'C$ ou son égal $I''I'D$. Et comme $D = 32° 54'$ l'angle I'' est droit. Malus, en recevant le rayon $I'I''$ sur une lame de verre inclinée de 35° 25, le trouva complètement polarisé. On peut remplacer la lame de verre par un prisme FGH de la même substance, dont les angles F et G sont de 32° 54, et placé dans une position telle que HF soit parallèle à BD. Le rayon disparaîtra complètement quand le second plan de réflexion sera perpendiculaire au premier. On pourrait supprimer la lame FGH et recevoir le rayon dans une tourmaline.

627. La polarisation de la lumière peut être produite par toutes les substances diaphanes; l'angle seulement est variable. M. Brewster a découvert à cet égard une loi fort simple; c'est que *la tangente de l'angle de la polarisation est égale à l'indice de réfraction*. Ainsi $\text{tang. } i = \frac{\sin. i}{\sin. r} = l$ (*fig.* 468). Mais $\text{tang. } i = \frac{\sin. i}{\cos. i}$, donc $\cos. i = \sin. r$; ainsi $r + i$ vaut un angle droit, donc $u + v$ vaut aussi un angle droit, donc, pour l'angle de polarisation, le rayon réfléchi est perpendiculaire au rayon réfracté. Ainsi il suffit de connaître l'indice de réfraction d'une substance pour en calculer l'angle de polarisation et réciproquement.

L'angle de polarisation sur la seconde surface d'une lame diaphane se trouve déterminé par la même loi; en effet, on a $\sin. i = l \sin. r$, $\sin. i = \cos. r$, d'où $\text{tang. } r = \frac{1}{l}$.

La loi précédente offre le moyen de déterminer l'indice de réfraction. Il suffit pour le mettre en pratique d'avoir une face polie.

L'indice de réfraction ayant une valeur particulière pour les diverses couleurs, il en résulte que ces dernières ne se polarisent pas sous le même angle, ce qu'on constate en recevant la lumière polarisée sur une glace qui doive l'absorber complètement. On y verra qu'il y a toujours une portion de lumière réfléchie par cette glace, et qu'elle est colorée en vert ou en rouge selon l'angle de polarisation.

Sous les autres incidences, la polarisation n'est que partielle, c'est-à-dire que la lumière réfléchie ne disparaît jamais en totalité. Cependant il faut

cas, a étant l'intensité maximum et d l'angle variable que fait le second plan d'incidence avec le premier. Cet angle est toujours compris entre 0 et 90; pour $d = 0$ $\cos.^2 d = 1$. $J = a$, pour $d = 90$ $\cos.^2 d = 0$. $J = 0$, et enfin pour $d = 45$, $\cos.^2 d = 1/2$, d'où $J = \frac{a}{2}$. L'exactitude de cette formule a été démontrée par les expériences de M. Arago.

Cette formule a conduit Malus à considérer un faisceau de lumière naturelle comme composé de deux faisceaux d'égale intensité, et polarisés à angle droit. Soit d l'angle du plan de la polarisation du premier avec le plan d'incidence, $90 - d$ sera l'angle analogue pour le second faisceau. L'intensité de la lumière réfléchie dans le premier sera $a \cos.^2 d$; dans le second $a \cos.^2 (90 - d)$, ou $a \sin.^2 d$. La somme sera a; c'est-à-dire qu'elle sera indépendante des diverses directions du plan d'incidence par rapport au rayon.

dire que les maximum d'intensité de l'image répondent toujours aux mêmes directions du plan de réflexion des glaces. Enfin, lorsque les faisceaux sont perpendiculaires, ou presque parallèles à la surface, la lumière réfléchie ne présente plus aucune trace de polarisation.

Il faut entendre par polarisation partielle, qu'une partie des rayons subit une polarisation complète, qu'une autre partie reste dans l'état naturel. Un faisceau lumineux, imparfaitement polarisé par une première réflexion, acquiert une polarisation plus complète par une seconde réflexion, et finit par être polarisé complètement, si le nombre des réflexions est suffisant.

628. Plusieurs corps opaques qui ne jouissent pas d'une puissance réfractive trop grande, tels que le marbre, les vernis noirs, peuvent aussi imprimer une polarisation complète aux rayons qu'ils réfléchissent régulièrement sur leur surface; tandis que d'autres corps parfaitement diaphanes, ou semi-transparens, mais très réfringens, tels que le diamant ou le verre d'antimoine, ne la polarisent jamais complètement; mais ce sont surtout les substances métalliques qui polarisent le moins bien la lumière, même sous les incidences les plus favorables. On entend toujours par angle de polarisation, celui sous lequel la polarisation est la plus grande quoiqu'incomplète.

L'angle de la polarisation complète est différent pour chaque substance. Il est de 35° 25′ pour le verre commun, de 31° pour la topaze, de 37° pour l'eau, de 23° pour le diamant. *Mais les modifications qu'a éprouvées la lumière, dans la polarisation complète, sont indépendantes de la substance qui les a déterminées.* Ainsi le rayon polarisé par le verre sous l'angle de 35° 25′, sera réfléchi ou transmis par une lame de topaze sous l'incidence de 31°, selon que le second plan de réflexion sera parallèle ou perpendiculaire au premier. (Ces angles sont comptés de la surface, le complément serait l'angle avec la perpendiculaire.)

Voici un procédé employé par M. Arago pour déterminer l'angle de la polarisation par réflexion. On place dans une grande salle un cercle horizontal divisé, et dont l'alidade porte un fil vertical. On marque sur les parois de la chambre des divisions verticales, qui, vues du centre du cercle, correspondent à des intervalles d'un demi-degré. On place au point occupé par le centre du cercle une face plane du fragment du corps qu'on veut observer. On la rend facilement verticale à l'aide d'un peu de cire molle. On place ensuite une bougie à une division déterminée. On fait tourner la face réfléchissante jusqu'à ce que la polarisation soit complète (n° 625). La moitié du supplément de la distance angulaire de la bougie donne l'angle de la lumière incidente avec la surface. On peut aussi déterminer le même angle à l'aide du goniomètre de Vollaston.

Pour observer l'angle de polarisation d'un liquide, M. Biot place ce liquide à un point déterminé d'une règle divisée en parties égales *A B* (*fig* 455 *bis*), et la bougie à une certaine hauteur près d'une tige verticale *A D*, également divisée et garnie d'un disque circulaire percé et mobile. L'inspection de la figure dispense de plus de détails.

629. *Polarisation par réfraction.* Un rayon de lumière qui traverse une lame de verre à faces parallèles, sous l'incidence de 35° 25′, est partiellement polarisé.

La lumière transmise est polarisée dans un plan *perpendiculaire* à celui d'incidence, comme on le reconnaît à l'aide des épreuves indiquées (n° 625). Elle se réfléchit sur une lame de verre sous l'incidence de 35° 25′, quand le plan de réflexion est perpendiculaire au plan d'incidence, et se transmet quand ces plans sont parallèles; elle s'éteint dans une plaque de tourmaline dont l'axe est perpendiculaire au plan d'incidence et se transmet quand il lui est parallèle.

Sous l'incidence perpendiculaire, il n'y a aucune portion de lumière polarisée par transmission.

M. Arago a reconnu que la quantité de lumière polarisée par réflexion, sur la surface d'un corps diaphane, est égale à celle qui se polarise par réfraction. L'énoncé de ce principe fort remarquable peut être généralisé ainsi : toutes les fois que la lumière se divise en deux faisceaux (sans qu'il y ait absorption), *la même quantité de lumière qui est polarisée dans l'un se trouve polarisée dans l'autre suivant une direction perpendiculaire.* On le vérifie, en constatant que la réunion du rayon transmis au rayon réfléchi produit de la lumière neutre.

Cette loi fait concevoir que, sous un angle quelconque d'incidence, il doit y avoir de la lumière polarisée par réfraction, puisqu'il y en a par réflexion. Comme pour tous les milieux soumis aux expériences, la lumière polarisée par une simple transmission est toujours plus faible que la moitié du rayon incident, il s'ensuit que la polarisation ne peut jamais être complète dans ce cas.

630. Il résulte encore des expériences de M. Arago que la lumière qui émane des corps incandescens, *si ces corps sont solides ou liquides* (platine chauffé au rouge, verre en fusion), est *partiellement polarisée par réfraction* quand les rayons observés forment avec la surface de sortie un angle d'un petit nombre de degrés. Quant à la lumière émanée des gaz enflammés, elle ne présente, sous aucune inclinaison, des traces sensibles de polarisation. M. Arago conclut de ce fait qu'une portion notable de la lumière qui nous fait voir les corps incandescens émane de leur intérieur. Il montre que le même moyen d'observation peut être appliqué à l'étude de la constitution physique du soleil : les résultats qu'il a déjà obtenus dans cette recherche confirment les conjectures de Bode, de Schoëter,

d'Herschel, *sur l'existence d'une atmosphère solaire.*

Voyez les halos pour une application analogue de la polarisation.

631. *Polarisation par double réfraction.* La lumière en traversant un rhomboïde de spath d'Islande, et en général un cristal doué de la double réfraction, subit un changement dans sa nature; en effet, 1° si les deux faisceaux provenant d'un premier cristal tombent perpendiculairement sur un second cristal dont toutes les faces sont parallèles à celles du premier, ainsi que les sections principales, on n'observe pas de nouvelle division. Le faisceau qui provient de la réfraction *ordinaire* du premier cristal, se réfracte *ordinairement* dans le second cristal, de même le faisceau *extraordinaire* dans le premier cristal, reste *extraordinaire* dans le second cristal.

2° Lorsque les sections principales sont à angle droit, le faisceau qui provient de la réfraction *ordinaire* du premier cristal, est réfracté *extraordinairement* par le second cristal, et réciproquement. Dans ce cas, comme dans le précédent, il *n'y a que deux images.* Mais dans toutes positions intermédiaires aux deux précédentes, chaque faisceau se divise en deux autres dans le second cristal. On réussit très bien dans cette expérience, en regardant à travers les deux rhomboïdes un point noir tracé sur un papier blanc, et en faisant tourner l'un des rhomboïdes, par exemple, celui qui est le plus près de l'œil, l'autre conservant une position fixe.

3° Les deux faisceaux produits par la transmission du faisceau ordinaire à travers le second rhomboïde ne sont *d'égale intensité* qu'autant que la section principale du premier fait un angle de 45° avec celle du second; pour toutes les autres positions, les deux faisceaux ou les deux images qu'ils donnent ont des intensités *inégales*, et même une d'elles s'évanouit entièrement lorsque la section principale du second rhomboïde est *parallèle* à celle du premier, c'est l'image *extraordinaire*, et l'image *ordinaire* parvient à son maximum d'éclat. Quand les deux sections principales sont à angle droit, l'image *ordinaire* disparaît, et l'image *extraordinaire* acquiert le maximum d'éclat. C'est l'*inverse* pour le faisceau extraordinaire.

632. Si l'on reçoit sur un rhomboïde de spath d'Islande, et perpendiculairement à sa surface, un faisceau réfléchi par une glace polie et non étamée, sous l'angle 35° 25′ compté de la surface, on remarquera qu'il y a *deux positions* dans lesquelles ce faisceau n'éprouve *aucune division* par son passage dans le cristal; ce sont celles où la section principale est parallèle ou perpendiculaire au plan de réflexion. Le faisceau transmis dans le cas *du parallélisme* jouit des propriétés du faisceau que nous avons appelé ordinaire, le rayon transmis dans le cas de la *perpendicularité* a toutes les propriétés du faisceau extraordinaire.

Si l'on fait tourner le cristal, on remarque que les deux images fournies par le faisceau sont d'égale intensité, quand le plan de réflexion fait un angle de 45° avec la section principale du cristal; que, pour les autres positions, les intensités sont inégales, et que l'inégalité est d'autant plus grande que le plan de réflexion s'écarte plus de 45° (1). Il résulte de ces expériences que la *lumière réfléchie* sous l'angle de 35° 25′ sur une glace polie, se comporte précisément comme le *faisceau ordinaire* sorti d'un cristal dont la section principale aurait été dirigée dans le plan de réflexion. Si le faisceau était partiellement polarisé, on pourrait le considérer comme de la lumière naturelle et de la lumière polarisée. La première se partagerait toujours en deux faisceaux égaux; la seconde se comporterait comme nous venons de l'indiquer.

633. Les diverses expériences précédentes montrent que la lumière modifiée par la réflexion sous une incidence particulière, ou par son passage à travers une lame douée ou non douée de la double réfraction, manifeste des propriétés très différentes selon qu'on présente une surface réfléchissante à tel ou tel côté de ses rayons. C'est ce qui a fait donner à ces phénomènes le nom de *polarisation*: ainsi un rayon polarisé présente, le long de chacune de ses faces, des propriétés particulières; tandis que toutes les faces d'un rayon ordinaire jouissent de propriétés exactement pareilles. On est conduit par là à supposer qu'un rayon de lumière ordinaire se compose, dans une étendue finie, d'une infinité de portions infiniment petites, dont chacune est polarisée dans un sens particulier, de manière à ce que, de quelque côté qu'on considère ce rayon, il présente, dans une longueur finie, un nombre égal de portions infiniment petites, semblablement polarisées.

634. On est convenu de dire du faisceau réfléchi par le verre sous un angle de 35° 25′, qu'il est polarisé dans le plan de réflexion; et du faisceau ordinaire sorti d'un rhomboïde de spath d'Islande, qu'il est polarisé dans le plan de la section principale.

Conséquemment on doit dire du faisceau extraordinaire, qu'il est polarisé perpendiculairement à la section principale, puisque nous avons vu qu'il présente dans ce sens les mêmes propriétés que le faisceau ordinaire dans le plan de la section principale; de même du rayon transmis dans la première expérience (n° 625), qu'il est polarisé perpendiculairement au plan de réflexion.

Pour trouver le plan de la polarisation d'un faisceau complètement ou partiellement polarisé, il suffira de recevoir ce faisceau dans un rhomboïde incliné de manière à produire deux images

(1) J étant l'intensité du rayon incident, et α l'angle du plan de polarisation avec la section principale, on aura $J \cos.^2 \alpha$ pour le rayon ordinaire et $J \sin.^2 \alpha$ pour le rayon extraordinaire. La somme des intensités sera toujours égale à J.

égales. Le plan de la polarisation sera incliné de 45° sur la section principale du rhomboïde.

On peut le recevoir perpendiculairement à une lame de cristal de roche, taillée parallèlement à l'axe. On la tourne jusqu'à ce que la lumière soit dépolarisée. Le plan de la dépolarisation du faisceau se trouve à 45° de la direction de l'axe de la lame.

On reconnaît que la lumière n'est plus poralisée, en la recevant sur l'un des appareils décrits à l'article *Polarisation colorée*.

Intensité de la lumière réfléchie.

635. Fresnel a été conduit à une formule générale pour représenter l'intensité de la lumière réfléchie. Cette formule est

$$T = \frac{\sin.^2(i-r)}{\sin.^2(i+r)} \cos.^2 A + \frac{\tan.^2(i-r)}{\tan.^2(i+r)} \sin.^2 A \quad (1).$$

L'unité représente l'intensité de la lumière incidente, T celle de la lumière réfléchie, i l'angle d'incidence, r l'angle de réfraction, A l'angle du plan de la polarisation de la lumière incidente avec le plan d'incidence ou de réflexion.

Cette formule une fois posée, la discussion en est facile. Supposons d'abord la lumière complètement polarisée dans le plan d'incidence, on a $A=o$, d'où $T = \frac{\sin.^2(i-r)}{\sin.^2(i+r)}$ (2).

Si $A = 90°$ et que i soit l'angle de la polarisation complète, on a $T = o$ (a). Si l'incidence i n'est pas celle de la polarisation complète, on n'aura plus $i + r = 90°$; et la formule devient

$$T = \frac{\tan.^2(i-r)}{\tan.^2(i+r)} \quad (3).$$

Supposons $A = 45°$, on a

$$T = 1/2 \frac{(\sin.^2(i-r)}{(\sin.^2(i+r)} + \frac{1 \tan.^2(i-r)}{2 \tan.^2(i+r)} \quad (4).$$

On arrive à la même formule en considérant deux faisceaux d'une égale intensité 1/2, et polarisés, l'un dans le plan d'incidence, l'autre dans un plan perpendiculaire ; car les deux faisceaux tombant sous le même angle, se réfléchissent sous le même angle, et l'intensité du faisceau réfléchi serait égale à la somme des seconds membres des équations (2) et (3) multipliés par 1/2. Si le faisceau incident n'était formé que de lumière naturelle, on pourrait toujours le considérer comme composé de deux faisceaux polarisés dans deux plans rectangulaires quelconques.

Enfin, supposons dans la lumière incidente, de la lumière polarisée et de la lumière naturelle (1).

Soit q la quantité de lumière polarisée, $1-q$ sera la quantité de lumière naturelle. Nous venons de voir que cette dernière est l'équivalent de deux faisceaux polarisés dans des plans rectangulaires et égaux à $\frac{1-q}{2}$: l'un de ces plans peut être le plan d'incidence. La formule (1) donne la quantité de lumière réfléchie polarisée, après toutefois la substitution de q à 1.

Les formules pour la lumière naturelle (2) et (3) donnent les quantités réfléchies ; en sorte que la somme est égale à $T = \frac{1 + q \cos. 2A}{2} \cdot$

$$\frac{\sin.^2(i-r)}{\sin.^2(i+r)} + \frac{1 - q \cos. 2A \tan.^2(i-r)}{2 \quad \tan.^2(i+r)}$$

Si l'on fait $q = 1$, on doit retomber et l'on retombe sur la formule (1) relative à la lumière complètement polarisée. Si $q = o$, on trouve la formule donnée pour la lumière polarisée à 45°, ou pour la lumière naturelle.

Si l'incidence était perpendiculaire, on arriverait à $T = \left(\frac{l-1}{l+1}\right)^2$ par la substitution de $i = l\,r$ à $\sin i = l \sin. r$.

Ainsi sous l'incidence perpendiculaire, la quantité de lumière réfléchie est la même, quel que soit l'état de la lumière.

Mouvement du plan de polarisation produit par la réflexion.

636. Il arrive qu'en général le plan de la polarisation d'un faisceau lumineux est changé par la réflexion.

La formule donnée d'abord par Fresnel, pour le cas où le plan de la polarisation du faisceau incident était incliné de 45° sur le plan d'incidence, a été généralisée par M. Brewster. Elle est $\tan. A' = \tan. A \frac{\cos.(i+r)}{\cos.(i-r)}$. A désigne l'angle du plan de polarisation du faisceau incident avec le plan d'incidence, A' l'angle du nouveau plan, i l'angle d'incidence, r l'angle de réfraction.

L'inspection de la formule montre que A' est toujours plus petit que A. Ainsi la réflexion rapproche le plan de polarisation du plan d'incidence.

Si $i + r = 90°$. (n° 627), on trouve $A' = o$. Ainsi, sous l'incidence de la polarisation complète, le plan ne change pas, quel que soit l'azimut du plan de la polarisation du faisceau incident.

Si l'on suppose $A' = A$, il viendra $\cos.(i+r) = \cos.(i-r)$, cette dernière égalité ne peut être

(1) Il est bien entendu qu'il s'agit d'une substance qui polarise complètement la lumière. Sur le diamant, par exemple, on n'aurait jamais $T = o$.

satisfaite qu'autant qu'on aura $i = o$, d'où $r = o$ ou $i = 90°$, d'où sin. $r = \frac{1}{n}$, (n° 536). Ainsi, la réflexion sous l'incidence perpendiculaire ou parallèle est la seule qui ne fasse pas changer l'azimut du plan de polarisation, quelle qu'en soit la valeur.

Si $A = 45°$, on a tang. $A' = \frac{\cos.(i+r)}{\cos.(i-r)}$. Cette formule a été vérifiée par les expériences de Fresnel.

637. *Polarisation par des réflexions successives.* Lorsqu'un faisceau de lumière naturelle se réfléchit sous une incidence différente de celle de la polarisation complète, on trouve que le faisceau réfléchi est partiellement polarisé, puisque l'image qu'il donne par son passage à travers une tourmaline change d'intensité avec la rotation de la plaque dans son plan.

M. Arago a tiré de ses expériences sur le verre et sur l'eau cette conséquence que, sous des incidences également éloignées de l'incidence propre à la polarisation complète, il se polarise des quantités égales de lumière.

M. Brewster n'admet plus de lumière naturelle dans un faisceau réfléchi, tout y est polarisé. Il considère un faisceau de lumière d'une intensité égale à l'unité comme un système de deux faisceaux égaux à 1/2, polarisés chacun dans un plan à 45° du plan d'incidence, l'un à droite, l'autre à gauche. Dans la réflexion, chacun des plans se rapproche du plan d'incidence; ces trois plans doivent coïncider après un certain nombre de réflexions. Ainsi la polarisation de la lumière naturelle paraît complète après cinq réflexions sur le verre, sous l'incidence de 70°.

Pour des développemens sur ce sujet, *voyez* le Mémoire de M. Brewster (*Trans. Phil.* 1830).

638. *Mouvement du plan de polarisation par la réfraction.* Le plan de polarisation peut changer par la réfraction comme par la réflexion, mais avec cette différence, qu'il s'éloigne du plan d'incidence ou de réfraction, et qu'il marque une tendance à lui devenir perpendiculaire; alors la lumière transmise renferme de la lumière polarisée perpendiculairement au plan de réfraction, en quantité d'autant plus grande que l'incidence est plus considérable. L'effet observé dans ces expériences est dû à l'action des deux faces.

Pour estimer l'influence de chaque face, il faut faire choix d'un prisme disposé de telle manière que la lumière traverse perpendiculairement la face d'émergence. Dans cette disposition, l'action de la dernière face est nulle. M. Brewster (*Trans. Phil.*, 1830) a donné la formule cot. $A' =$ cot. A cos. $(i-r)$. La notation est celle des équations ci-dessus. Supposons que la lumière tombe sur une lame à faces parallèles et que le plan de polarisation soit incliné de 45°; c'est le cas de la lumière naturelle, si cette lumière peut être représentée par deux parties égales polarisées dans deux plans rectangulaires, on aura cot. $A = 1$, et par suite cos. $A' =$ cos. $(i-r)$. Le faisceau tombera sur la seconde face avec cet azimut, A' et sous l'incidence r; mais cos. $(i-r) =$ cos. $(r-i)$, ainsi l'on aura cot. $A'' =$ cot. A' cos. $(i-r) =$ cos.^{2} $(i-r)$.

M. Brewster a vérifié cette formule par des expériences multipliées sur le verre, depuis l'incidence 10° jusqu'à l'incidence 86°, le plan d'incidence restant constant; de plus il l'a vérifiée pour une incidence constante et pour un azimut variable.

639. *Polarisation produite par des réfractions successives.* La première face d'une lame diaphane augmente l'azimut, la seconde l'augmente encore, en sorte qu'après plusieurs transmissions le plan de polarisation est perpendiculaire au plan d'incidence et de réfraction. M. Brewster a trouvé que la lumière d'une bougie est complètement polarisée sous l'incidence 78° 52′ par 8 lames, par 24 sous 61°, et par 47 sous 42° 34′.

640. Les rayons polarisés n'exercent plus d'influence les uns sur les autres, quand leurs plans de polarisation sont *perpendiculaires* entre eux, c'est-à-dire qu'ils ne forment plus de franges, quoique toutes les conditions nécessaires à leur apparition, dans le cas ordinaire, soient scrupuleusement remplies.

Ce fait important a été établi par des expériences précises de Fresnel et de M. Arago.

La première, qui appartient à M. Arago, consiste à faire traverser à deux faisceaux, émanés du même point lumineux, et passant chacun par une fente parallèle à celle par laquelle l'autre passe, deux piles égales de lames transparentes très minces de mica ou de verre soufflé, qu'on incline de manière à rendre la polarisation presque complète. Lorsque les plans suivant lesquels on incline les piles sont parallèles, on aperçoit les franges; mais elles s'affaiblissent à mesure que ces plans s'éloignent du parallélisme, et enfin elles disparaissent quand ceux-ci sont perpendiculaires, quelques soins qu'on prenne pour compenser les différences de marche.

Dans la deuxième, on partage en deux parties une lame de sulfate de chaux ou de cristal de roche, taillées parallèlement à l'axe, et d'une épaisseur uniforme. On place chaque moitié sur une des fentes d'un écran. (Voyez *Diffraction.*) On dispose d'abord les deux lames de manière que les bords, qui étaient contigus, restent parallèles : en sorte que les axes le sont aussi. Si l'on fait tourner l'une des lames, on voit le groupe central des franges s'affaiblir; et il disparaît entièrement quand les axes des deux lames sont perpendiculaires, mais il en naît deux autres. Il faut conclure que les rayons qui produisent le groupe central par leur interférence ne sont plus capables de s'influencer mutuellement. Or, ici, comme les deux lames sont d'égale épaisseur, et

qu'elles sont l'une et l'autre perpendiculaires aux rayons incidens, les franges centrales doivent être produites par les rayons qui ont subi le même mode de réfraction dans les deux lames, puisque, les ayant parcourues avec des vitesses égales, ils doivent arriver simultanément au milieu de l'espace éclairé. Ainsi ces franges résultent de l'interférence des rayons ordinaires de la lame de gauche avec les rayons ordinaires de la lame de droite. De même pour les rayons extraordinaires, les premiers sont polarisés suivant la section principale, les autres dans un sens perpendiculaire.

Pour la troisième expérience, on polit deux faces parallèles d'un rhomboïde de spath d'Islande; on partage ce cristal en deux parties par un plan perpendiculaire aux faces polies. Si l'on place l'un de ces rhomboïdes sur l'autre, de manière que deux faces polies soient en contact, et que les sections principales fassent un angle droit, si l'on reçoit un rayon sur l'un d'eux, perpendiculairement à la face polie, on sait qu'il n'y aura que deux images. L'image ordinaire du premier cristal devient extraordinaire par son passage à travers le second, cristal, et réciproquement. Ainsi les différences de marche se trouvent compensées dans les deux faisceaux émergens. Ils se croisent d'ailleurs sous un angle très petit, et sont conséquemment propres à produire des franges : néanmoins Fresnel n'a pu en apercevoir.

Ainsi il est démontré que deux rayons polarisés à angle droit, ne peuvent exercer aucune influence sensible l'un sur l'autre, c'est-à-dire que leur réunion produit toujours la même intensité de lumière, quelle que soit la différence de marche des deux systèmes d'ondes qui interfèrent. (*Voyez* les *Interférences*.) Si, dans ces expériences, on s'arrange de manière à écarter les plans de polarisation de la perpendicularité, on parvient toujours à faire paraître les franges.

Mais un fait qui paraîtra bien étrange, c'est le suivant. Deux rayons naturels qui passent immédiatement à l'état de rayons polarisés rectangulairement, perdent pour toujours la propriété d'interférer, quoiqu'on les ramène par des réflexions convenablement combinées, à l'état de rayons polarisés parallèlement. Si au contraire deux rayons reçoivent d'abord une polarisation commune avant d'éprouver une polarisation rectangulaire, ils pourront interférer de nouveau si on leur rend la polarisation parallèle.

641. *Polarisation chromatique.* Quand un faisceau de lumière polarisée passe au travers d'un rhomboïde de spath d'Islande, dont la section principale est parallèle au plan de polarisation, l'image extraordinaire s'évanouit (n° 632); M. Arago a vu l'image reparaître en plaçant devant le rhomboïde une plaque cristallisée douée de la double réfraction, et dont la section principale ne fût ni parallèle ni perpendiculaire au plan primitif de polarisation; l'intensité en devenait même égale à celle de l'image ordinaire, quand cette section était inclinée de 45° à ce plan; dans ces cas, les deux images étaient blanches, si la plaque interposée était assez épaisse, si elle avait, par exemple, au moins un demi-millimètre pour le cristal de roche ou le sulfate de chaux; mais, si elle était plus mince, les deux images se coloraient de teintes complémentaires, qui changeaient de nature avec l'épaisseur de la lame interposée, et variaient seulement d'intensité quand on la faisait tourner dans son plan, en la laissant toujours perpendiculaire aux rayons incidens.

Dans la même circonstance, le faisceau naturel ne donnait que des images incolores. On a donc encore là un bon moyen de reconnaître si une lame renferme de la lumière polarisée.

Cette belle découverte a occupé un grand nombre de physiciens. MM. Biot et Fresnel en France, MM. Young, Brewster et Herschel en Angleterre, MM. Seebeck et Mitscherlich en Allemagne.

M. Biot avait remarqué que pour le spath et plusieurs cristaux, les couleurs des lames cristallisées suivent des lois analogues à celles des anneaux colorés, c'est-à-dire que *les épaisseurs de deux lames cristallisées*, de même nature, qui donnent deux teintes quelconques, sont entre elles comme *les épaisseurs des lames d'air* qui réfléchissent les teintes semblables dans les anneaux colorés.

Mais M. Herschel en a trouvé d'autres et notamment l'apophyllite, la vésuvienne (idocrase), et le sel de La Rochelle (tartrate de potasse et de soude), qui suivent dans leurs colorations des lois tout-à-fait différentes.

L'épaisseur relative à une teinte déterminée varie pour les diverses substances. Ainsi, par exemple, une lame de chaux carbonatée, parallèle à l'axe, doit être dix-huit fois plus mince qu'une lame semblable de cristal de roche ou de gypse pour produire la même teinte.

Young a remarqué que les couleurs des lames cristallisées doivent être attribuées à l'interférence des rayons ordinaires avec les rayons extraordinaires. Fresnel a fait voir que la lumière doit être préalablement polarisée, pour que l'interférence des rayons ordinaires et extraordinaires soit possible, quand on les ramène dans le même plan par un autre cristal; il a démontré de plus que les deux images sont complémentaires; enfin, il a donné l'explication complète du phénomène dans la théorie des ondes. Nous ne pouvons entrer dans tous les détails nécessaires à ce sujet.

M. Biot avait avant proposé une théorie connue sous le nom de *Théorie de la polarisation mobile*, fondée sur l'émission.

642. *Anneaux colorés des lames cristallisées. Cristaux à un axe.* On reçoit perpendiculairement, sur une lame taillée perpendiculairement à l'axe, un faisceau de lumière polarisée, et on le regarde à son émergence à travers une plaque de tourmaline, taillée parallèlement à l'axe. On aperçoit une série

d'anneaux circulaires, concentriques. On pourrait supprimer la première tourmaline, et recevoir sur la plaque cristallisée la lumière réfléchie par un miroir. L'expérience réussit, quel que soit le mode de polarisation; mais ordinairement on prend un rayon polarisé par la réflexion sur un verre, ou, plus simplement, on place la lame cristallisée entre deux plaques de tourmaline parallèles à l'axe.

Nous supposerons qu'on opère sur une lame de spath d'Islande, qui donne des anneaux très réguliers.

Si l'axe de la plaque de tourmaline en contact avec l'œil, est *parallèle* au plan primitif de polarisation, on aperçoit une série d'anneaux traversés par *une croix noire*, dont une des branches coïncide avec la section principale (*fig.* 4, pl. 17). Si cet axe est perpendiculaire, la nouvelle image est complémentaire de la première; ainsi *la croix noire* est remplacée par une croix blanche (*fig.* 5, pl. 17).

Si l'on se sert de l'appareil des deux tourmalines, on observe les premiers anneaux quand elles sont croisées, et le second quand elles sont parallèles.

Si l'on fait tourner lentement l'une des tourmalines ou la tourmaline quand on examine la lumière polarisée par réflexion, on peut suivre la transformation de l'un des systèmes dans l'autre.

Pour étudier les lois auxquelles sont assujettis ces anneaux, il faut opérer sur une lumière homogène. On remplit cette condition en plaçant sur le trajet du faisceau polarisé un verre coloré, par exemple, un verre rouge; on peut d'ailleurs recevoir l'une des couleurs d'un spectre.

On arrive à trois résultats généraux :

1° La grandeur des anneaux est en ordre inverse de la réfrangibilité.

2° Les carrés des diamètres des anneaux sont dans une même lame, comme la suite des nombres naturels 0, 1, 2, 3, 4.

3° Pour des lames de différentes épaisseurs, ces carrés, pour les anneaux du même ordre, sont en raison inverse des racines carrées des épaisseurs.

On se rend compte, d'une manière générale du moins, de la cause qui produit ces anneaux : soit $M\,M'$ *fig.* 21, p. 17, une plaque perpendiculaire à l'axe, O la position de l'œil, $S\,S'\,O$ la partie visible du faisceau; la base $I\,I'$ de ce cône varie avec la distance de l'œil, et l'axe $A\,O$ s'en confond avec l'axe du cristal : les rayons voisins de l'axe $A\,O$ traversent le cristal sans changer de plan de polarisation. Ainsi ils sont éteints dans la tourmaline dont l'axe est parallèle au plan de polarisation. Ainsi il y aura un point noir au milieu.

Il s'agit de montrer que les rayons également éloignés de l'axe n'éprouvent pas les mêmes modifications. Soit $I\,I'\,B\,B'$, *fig.* 22, pl. 17, la section du faisceau à sa sortie de la plaque; soit $I\,I'$ le plan primitif de polarisation. Les rayons I et I' et les intermédiaires restent polarisés dans le plan $I\,I'$. Il en est de même des rayons B et B' qui sont perpendiculaires au plan $I\,I'$; mais un rayon intermédiaire, dirigé suivant $O\,D$, et polarisé suivant $a\,b$ parallèle à $I\,I'$, se partage en deux, l'un ordinaire suivant $O\,D$, l'autre extraordinaire suivant $F\,K$, perpendiculaire à $O\,D$. Plus le méridien $O\,D$ sera près du plan $I\,I'$, plus le rayon ordinaire sera intense, et plus le rayon extraordinaire sera faible. Ainsi les rayons ordinaires seront à leur maximum dans le méridien $I\,I'$ et les extraordinaires dans le méridien $B\,B'$.

Voyons maintenant ce qui arrivera dans la tourmaline : Les rayons situés dans les méridiens $I\,I'$ et et $B\,B'$ étant polarisés parallèlement à la section principale seront absorbés (n° 625). Ainsi on apercevra une *croix noire*. Mais tout rayon intermédiaire, ordinaire ou extraordinaire, donnera naissance à un rayon extraordinaire qui traversera la tourmaline; de plus, les rayons placés dans un même méridien, ayant, à cause de leur obliquité, parcouru des chemins inégaux dans la plaque perpendiculaire et dans la tourmaline, pourront donner, par leur interférence, des points lumineux ou obscurs, et comme tout est symétrique autour de l'axe $A\,O$, il se formera une série de cercles alternativement colorés ou obscurs.

Si la section principale de la tourmaline était perpendiculaire au plan primitif de polarisation, alors ce seraient les rayons ordinaires qui passeraient, et la croix noire serait remplacée par une croix blanche ou colorée, selon que le faisceau primitif serait de la lumière blanche ou colorée. Comme nous l'avons déjà dit, les anneaux produits n'occuperaient plus exactement les mêmes lieux, puisqu'ils seront formés par d'autres rayons.

Dans tous les cristaux à un axe, le phénomène n'est pas aussi net que dans le spath d'Islande pur. Quelquefois dans le spath même et dans d'autres cristaux, les anneaux sont ovales et les croix contournées. Le quartz et le béril présentent fréquemment ces anomalies. Dans l'hyposulfate de chaux, et dans l'apophyllite de Cipit en Tyrol, les anneaux avec la lumière blanche sont sensiblement noirs et blancs.

M. Babinet s'est assuré que les couleurs qui composent un même système d'anneaux sont complémentaires, et que leur somme reproduirait de la lumière blanche. Il suffit en effet de dépolir la face postérieure de la plaque perpendiculaire à l'axe pour les faire disparaître en les transformant en une illumination incolore; si la partie dépolie est en avant les anneaux subsistent.

643. *Cristaux à deux axes.* Un cristal taillé perpendiculairement à la ligne moyenne, et substitué au cristal à un axe, dans l'appareil des deux tourmalines, produit deux systèmes d'anneaux elliptiques, traversés par une croix blanche ou noire (*fig.* 6, pl. 17).

Si l'on fait tourner la plaque à deux axes, les autres parties de l'appareil restant fixes, les croix se déforment. Les *fig.* 7, 8, 9 représentent les apparences au commencement de la rotation à 22° 30′

et à 45°. Les mêmes phénomènes se reproduisent dans les quatre cadrans. Les lames de nitre de 1, 2 et 3mm sont très propres à ce genre d'expériences. Les axes de ce cristal, qui font entr'eux un angle d'environ 6°, sont symétriquement placés par rapport à l'axe de cristallisation, dans un plan perpendiculaire aux faces du cristal. On coupe d'abord les cristaux perpendiculairement à l'axe de cristallisation, puis on les use en le humectant un peu.

Le centre de chaque système d'anneaux correspondant au prolongement de l'axe autour duquel il se produit. Ces expériences fournissent un moyen de distinguer les cristaux à un axe, des cristaux à deux axes; il suffit pour cela de couper ceux-ci jusqu'à ce qu'on arrive à la production des anneaux. On peut même déterminer et la direction des axes et l'angle qu'ils font entr'eux.

Si l'angle des axes était un peu grand, s'il avait seulement 15 à 20 degrés, on ne pourrait plus embrasser dans le même champ les deux systèmes d'anneaux.

Dans le mica les angles varient de 0 à 45°. On détermine d'abord les deux directions dans lesquelles la lumière passe sans changer de plan de polarisation; pour cela, on présente la lame de mica perpendiculairement à un rayon polarisé par réflexion sur un miroir de verre noir, et l'on reçoit la lumière dans une tourmaline, dont la section principale soit parallèle au plan de polarisation. On trouvera, si l'on fait tourner la lame de mica dans son plan, deux positions dans lesquelles toute la lumière sera éteinte dans la tourmaline comme si elle n'avait pas traversé le mica. On les marquera avec une pointe d'acier, on verra qu'elles sont rectangulaires. L'une de ces directions est la section principale contenant les deux axes. Ensuite, on présente la lame perpendiculairement à un rayon polarisé, et de manière que le plan de la polarisation partage en deux parties égales l'angle des deux sections précédentes; on incline successivement la lame autour de chacune de ces sections, et l'on obtient les anneaux, et conséquemment la direction des axes, en tenant compte de la réfraction.

Il résulte des expériences de M. Herschel que la direction des axes varie pour chaque couleur, et qu'ils sont contenus tous dans un même plan, qui est celui de la section principale. On peut constater le changement de direction de chaque axe, dans le passage d'une couleur à une autre, de la manière suivante : on fait tomber un rayon homogène sur l'appareil des deux tourmalines, entre lesquelles se trouve une plaque de tartrate de potasse et de soude taillée perpendiculairement à l'un des axes, et l'on reçoit les anneaux sur un tableau. On voit le centre des anneaux se déplacer quand on passe de la lumière rouge à la lumière violette.

De nouvelles recherches du même savant, conformes à celles de M. Norrenberg, ont montré que dans certains cristaux (le gypse, par exemple), tous ces axes ne sont pas dans le même plan. M. Norrenberg a même trouvé des cristaux (le nitrate de mercure) dans lesquels la ligne moyenne varie pour chaque couleur.

Si, dans l'expérience qui vient d'être citée, ou dans toute expérience pareille faite avec un cristal à deux axes, on reçoit les anneaux, comme l'a fait M. Herschel, produits par chaque couleur, sur un papier tendu sur un cadre, et qu'on marque les pôles et les contours des anneaux, on trouve que ces anneaux forment des courbes connues des géomètres sous le nom de *lemniscates*.

La figure 10 représente cette courbe dans toutes ses variétés. Le caractère principal en est, que le produit des deux distances d'un point aux centres est égal à une quantité connue, laquelle varie d'une courbe à l'autre; ainsi l'on a $Ap \times Ap' =$ une quantité constante.

644. *Polarisation circulaire.* Un rayon de lumière polarisée ne change pas en général de plan de polarisation, en traversant perpendiculairement un cristal biréfringent taillé perpendiculairement à l'axe. Le plan primitif de la polarisation est toujours contenu dans la section principale du cristal.

M. Arago a découvert que le cristal de roche jouit de la propriété de faire tourner le plan de polarisation, c'est-à-dire que le rayon émergent est comme il serait si l'on avait fait tourner le plan de polarisation (*Mém. de l'Inst.*, 1812). Certains échantillons portent le plan à droite, d'autres à gauche (M. Biot). Voici les résultats généraux découverts par ce dernier sur cette matière.

1° L'action des plaques d'un même cristal s'exerce toujours dans le même sens, et est proportionnelle à l'épaisseur; en sorte qu'une plaque pourrait être assez épaisse pour ramener le nouveau plan de polarisation d'un rayon donné dans le plan primitif.

2° Les cristaux qui agissent en sens contraire, ont, sous la même épaisseur, une énergie égale, mais de signe contraire.

3° L'effet de plusieurs plaques est égal à la somme ou à la différence des effets partiels, selon que ces plaques agissent dans le même sens, ou dans des sens différens.

4° L'action d'une plaque sur un rayon est d'autant plus énergique qu'il est plus réfrangible (1). D'après M. Biot, une plaque de cristal de 1mm d'épaisseur dévie le plan de polarisation.

Pour le rouge extrême, de	17° 21'
Pour le violet extrême,	44° 5'

Il résulte de là qu'un faisceau blanc polarisé, qui traverse une plaque de cristal de roche, doit, après son passage, donner des couleurs quand on les regarde avec un prisme biréfringent ou une tourmaline. On peut déterminer la composition des teintes, d'après les données précédentes, comme M. Biot l'a vérifié.

(1) M. Biot vient de trouver que l'acide tartrique fait exception.

Certains échantillons d'améthyste offrent des couches successives, qui font alternativement tourner le plan de polarisation à droite ou à gauche; en sorte qu'une plaque de cette substance, convenablement taillée, offre des franges, quand on la présente, comme dans les expériences précédentes, à un rayon polarisé (M. Brewster).

Un fait encore fort curieux, c'est que dans la variété de quartz, nommé *plagiédral*, le sens des facettes non symétrique paraît lié au sens de la rotation (M. Herschel).

M. Biot et M. Seebeck ont trouvé que des liquides et même des vapeurs jouissent de la propriété de faire tourner le plan de polarisation. Comme le pouvoir rotatoire de ces substances est très faible, on est obligé de les renfermer dans des tubes assez longs. Une plaque de cristal de roche de 1^{mm}, déviant le rayon rouge moyen de 18° 25, une épaisseur égale d'essence de térébentine ne la dévie que de 16'. Si l'on mêle plusieurs liquides, l'effet total est égal à la somme ou à la différence des effets individuels, selon que ces liquides sont de même signe ou de signe contraire.

Le délaiement des parties n'en altère pas la faculté rotatoire. Ainsi M. Biot a mis dans des tubes de même diamètre, mais d'inégale longueur, la même quantité d'essence de térébenthine, et il a achevé de les remplir avec de l'éther sulfurique, substance privée de la propriété rotatoire; ces deux épaisseurs composées donnent la même rotation. Il résulte de ce dernier fait, cette conséquence, que l'action dont il est question est inhérente aux particules d'essence; cependant il ne faudrait pas trop généraliser, car le quartz fondu dans la potasse, perd, d'après Brewster, sa vertu rotatoire. La liqueur des cailloux ne la possède pas non plus (Herschel).

La manière la plus commode de faire aujourd'hui les expériences, est de placer une plaque de cristal de roche entre les plaques de tourmaline croisées; la lumière qui était éteinte reparaîtra. On tourne à gauche ou à droite jusqu'à ce qu'on aperçoive une croix bleuâtre; en continuant dans le même sens, on tombe sur une croix rougeâtre. La couleur bleue se manifeste, parce que la couleur rouge, moins réfrangible, éprouve une rotation moindre; en sorte qu'il ne reste que la couleur complémentaire.

Nous donnerons dans ce qui suit une idée de ce que c'est qu'un rayon polarisé circulairement d'après Fresnel.

645. *Polarisation circulaire par des réflexions totales successives.* Soit *A B C D* (*fig.* 12, pl. 17) une lame de verre taillée en forme de parallélipipède, ayant les angles aigus de 54°, et conséquemment les angles obtus de 126°. Un rayon polarisé *S I* entre perpendiculairement à la face *B A*, subit la réflexion totale en *I* et en *I'*; puis sort parallèle à sa direction primitive. Le rayon émergent *S' I'* paraîtra dépolarisé, c'est-à-dire qu'il donnera, par son passage dans un sens quelconque, à travers le prisme biréfringent, deux images incolores et également intenses, si le plan de polarisation fait un angle de 45° avec le plan des deux réflexions. Néanmoins ce rayon diffère d'un rayon de lumière naturelle. 1° Deux nouvelles réflexions totales sous le même angle, dans une lame semblable, quelle que soit la direction du nouveau plan de réflexion, lui rendent la polarisation dans un plan unique. Si les deux plans de réflexion coïncident, le nouveau plan de polarisation coïncide avec le premier. 2° Les teintes que ce rayon donne par son passage à travers les lames cristallisées, diffèrent de celles que fournit la lumière naturelle. 3° Ce rayon est polarisé circulairement, et est identique avec l'un des rayons obtenus dans l'expérience du triple prisme de cristal de roche que nous allons rapporter. En effet, chacun de ceux-ci, par une double réflexion dans le parallélipipède de verre, donne, l'un, un rayon polarisé à 45° à droite, et l'autre, un rayon polarisé à 45° à gauche du plan des réflexions, quelle que soit la position de ce dernier.

Soit un prisme rectangulaire *A B C D* (*fig.* 11, pl. 17), composé de trois prismes triangulaires *A B F*, *A D F* et *B F C* réunis par de la térébenthine. Dans le prisme *A B F* dont l'angle *F* est de 150°, la ligne *A B* est parallèle à l'axe, et les lignes *A F* et *B F* sont également inclinées sur cet axe. Les deux prismes extrêmes sont tirés d'un cristal qui produit une rotation en sens contraire à celle du prisme du milieu. Les faces *A F* et *B F* de ces derniers sont taillées de manière que les axes des trois prismes sont parallèles. Ce prisme composé jouit de la propriété de diviser en deux un faisceau polarisé qui le traverse parallèlement à l'axe, c'est-à-dire à *A B*. Ainsi le quartz exerce une double réfraction dans le sens de son axe, ou, en d'autres termes, il imprime des vitesses différentes à chacun des faisceaux.

Cette double réfraction a un caractère particulier; chaque faisceau donne à travers un prisme biréfringent deux images blanches également intenses, quel que soit le plan de la section principale de ce prisme, tandis que chacun des faisceaux de la double réfraction ordinaire change d'intensité à chaque quart de révolution du prisme.

La disposition de ce prisme est fondée sur ce que, si les deux faisceaux polarisés circulairement en sens contraire, prennent des vitesses différentes dans le premier prisme *A D F*, ils éprouvent des réfractions différentes dans le prisme du milieu, et d'autant plus différentes, qu'ils y changent de rôle, le plus rapide devient le plus lent; ils changent encore dans le troisième prisme *B F C*.

646. *Compression.* Nous avons vu que la compression donne au verre la propriété de doubler les images. La trempe, la compression, l'induration, en un mot toutes les circonstances qui modifient l'état moléculaire, inégalement dans différens sens,

tendent à donner aux corps transparens le caractère des corps biréfringens.

Trempe. — L'observation des couleurs auxquelles la trempe du verre donne naissance peut se faire de plusieurs manières.

On place une plaque de verre trempé horizontalement devant une fenêtre, et l'on reçoit perpendiculairement dans une tourmaline la lumière réfléchie sous l'angle de la polarisation complète. On aperçoit sur la seconde face de la plaque, des figures colorées qui présentent une sorte de symétrie. On fait l'expérience d'une manière plus commode en tenant la plaque de verre perpendiculairement à la lumière réfléchie et polarisée par un verre noir, et en recevant la lumière transmise dans une tourmaline à une certaine distance.

La forme des anneaux, dans les cristaux biréfringens, est indépendante de la forme extérieure du cristal. Dans les corps qui ont reçu d'une manière passagère ou permanente la structure biréfringente, il existe une dépendance entre la forme extérieure du solide et celle des anneaux.

Les figures 13 et 14, pl. 17, représentent les apparences des plaques carrées, une croix noire au milieu, et des cercles colorés aux quatre coins. Si l'on tourne la plaque dans son plan, on obtient la *fig.* 15. La *fig.* 16 représente les apparences d'une plaque rectangulaire. La *fig.* 17 celle d'une plaque hexagonale. Enfin la *fig.* 14 *bis* celle d'une plaque circulaire.

Ces couleurs dépendent de l'inégale élasticité de l'éther dans différens sens; d'où il résulte des inégalités de vitesse et par suite des interférences.

Inégale dilatation ou compression. Le trouble de l'homogénéité d'aggrégation dans un corps diaphane solide, lui fait acquérir la propriété de colorer la lumière polarisée. Nous nous bornerons à rapporter quelques résultats. On voit dans la *fig.* 18, pl. 17, l'apparence présentée par une lame de verre courbée dans sa longueur. La ligne moyenne *m n* conserve son état naturel; de part et d'autre de cette ligne les couleurs suivent un ordre opposé : dans la partie convexe où il y a dilatation, et dans la partie concave où il y a compression, à égale distance de la ligne *m n*, les teintes sont opposées. Deux lames semblablement courbées présentent dans leur croisement l'apparence indiquée par la *fig.* 19, pl. 17. Dans la ligne *A A'*, sans polarisation, les effets contraires se détruisent (M. Brewster).

La compression d'une lame de verre dans un étau, d'une gelée entre des lames de verre, produit des résultats analogues. Les effets obtenus par l'échauffement ou le refroidissement sont encore de la même nature. On représente dans la *fig.* 20, pl. 17, l'état d'une lame de verre posée sur une barre de métal chauffée au rouge.

Quand la compression ou le changement de température n'a pas été assez grand pour que les particules de la substance transparente ne reprennent pas leur état primitif après que ces actions ont cessé, les apparences disparaissent.

On doit altérer, et l'on altère en effet, par la compression, les propriétés des cristaux biréfringens. La plupart de ces expériences sont dues à MM. Seebeck et Brewster.

Des corps mous acquièrent par une dessiccation inégale des propriétés analogues à celles que la compression et la trempe donnent au verre.

647. *Absorption de la lumière polarisée.* Les corps biréfringens absorbent inégalement les rayons polarisés selon l'inclinaison des plans de polarisation des rayons par rapport à l'axe des cristaux.

Nous citerons quelques exemples : La tourmaline brune (n° 625) nous en a déjà offert un exemple. Une lame un peu épaisse de cette substance, taillée parallèlement à l'axe, absorbe presque complètement la lumière polarisée dans un plan parallèle à cet axe.

Le carbonate de baryte absorbe presque totalement l'un des deux faisceaux dans certaines directions; dans d'autres il donne deux images égales.

Le mica, le nitre, le baume de Copahu, etc., présentent une absorption analogue; c'est encore à l'absorption qu'est dû le *dichroïsme;* on sait que certaines substances laissent voir deux couleurs différentes selon qu'on les regarde dans un sens ou dans un autre. Ces effets dépendent encore de la position des axes.

La dichroïte est bleue dans un sens parallèle à l'axe, et jaune dans un sens perpendiculaire. Le chlorure double de potassium et de palladium est rouge dans le sens de l'axe, et vert dans un sens perpendiculaire.

De la diffraction.

648. On a donné le nom de diffraction aux modifications que la lumière éprouve dans son passage près des extrémités des corps. Un grand nombre de phénomènes du même genre ont été observés depuis peu d'années, en sorte que ce sujet est aujourd'hui un des plus étendus de l'optique. Nous nous bornerons cependant à le faire connaître d'une manière générale.

Si l'on introduit un faisceau de lumière dans une chambre obscure, par une ouverture très petite, par exemple, d'un dixième de millimètre, pratiquée dans une feuille métallique, on remarque que les ombres des corps, au lieu d'être nettement terminées et d'une manière tranchée, comme cela devrait arriver si la marche de la lumière était toujours rectiligne, sont bordées de trois franges colorées bien distinctes, dont les largeurs sont inégales, et vont en diminuant de la première à la troisième; quand le corps interposé est delié, comme un fil de fer très fin, on aperçoit même des franges dans son ombre, qui paraît alors partagée par des bandes

obscures et des bandes claires, placées à des distances égales les unes des autres. Ces dernières sont les franges *intérieures;* les premières sont les franges *extérieures*. Grimaldi a observé le premier ces franges avec soin.

Pour constater la formation des franges, supposons qu'on place à un mètre de distance un fil de fer ayant un millimètre de diamètre, qu'on reçoive à trois mètres du trou, et conséquemment à deux mètres du fil, l'ombre de ce dernier sur un carton. Si le trou était infiniment petit, et si le point lumineux était un point mathématique, l'ombre du fil projeté sur le carton aurait trois millimètres de largeur (*fig.* 475). Mais dans notre expérience, la largeur du trou diminue l'ombre pure; le diamètre de ce trou étant d'un dixième de millimètre, les rayons extrêmes partis des bords sont éloignés des rayons partis du centre d'un vingtième de millimètre; et puisque le carton est deux fois plus éloigné du fil de fer que celui-ci du point lumineux, l'ombre pure (*fig.* 470) sera diminuée d'un dixième de millimètre de chaque côté, et sera réduite à $2^{mm},8$. L'espace $M\,N\,P\,Q$ serait complètement privé de lumière, si les rayons n'éprouvaient aucune inflexion dans l'intérieur. Or, si l'on fait l'expérience avec attention, on découvre dans l'ombre pure des bandes légèrement éclairées.

Expériences principales.

649. *Bords des écrans.* On reçoit dans une chambre obscure un faisceau lumineux horizontal, qui traverse d'abord un verre coloré, tombe sur une lentille d'un court foyer, et va raser le bord d'un écran $B\,C$ (*fig.* 24, pl. 17), très mince et bien dressé. Si l'on place à une certaine distance un carton ou un verre dépoli, on observe, à droite de $A\,B\,F$, trace de l'ombre géométrique, une lumière faible qui va s'éteindre à une assez grande distance.

On observe à gauche, des franges alternativement brillantes ou sombres. La frange B, la plus rapprochée de l'ombre géométrique, est la frange brillante du premier ordre; à côté est la frange sombre O du premier ordre; on peut ainsi compter jusqu'à sept franges sombres distinctes. Au delà elles disparaissent dans l'espace éclairé. Ces franges sombres ou brillantes sont parallèles entre elles et au bord de l'écran.

Les franges produites par la lumière violette sont plus étroites et plus rapprochées de l'ombre géométrique. Il résulte de cette inégalité de position et de largeur des franges de diverses couleurs, que la lumière blanche ne doit pas donner des franges alternativement sombres ou blanches, mais des franges colorées de diverses nuances. En effet, à partir de la trace $A\,B$ la couleur violette doit manquer la première et la couleur rouge la dernière.

Les franges semblent prendre naissance au bord de l'écran, et se propagent suivant des *hyperboles*, dont le centre commun est en M, milieu $B\,F$, et le sommet sensiblement au bord même de l'écran. La position des foyers de ces hyperboles dépend de la distance de l'écran au point lumineux, de la lumière employée et de l'ordre des franges.

Voici quelques résultats tirés du mémoire de Fresnel :

Lumière rouge. Distance entre le point lumineux et l'écran, un mètre. Angle formé par l'hyperbole ou plutôt son asymptote avec la trace géométrique $A\,B$. Premier ordre $3'\ 35''$. Septième ordre $10'\ 3''$. — Distance $0^m 1$. — Premier ordre. Angle $11'\ 20''$. Septième ordre $31'\ 45''$.

Lumière violette. Pour mêmes distances et mêmes ordres $2'\ 58''$ et $8'\ 18''$; $9'\ 22''$ et $26'\ 14''$.

650. *Corps étroits rectilignes.* L'expérience se fait comme la précédente (*fig.* 25, pl. 17). $L\,L'$ est un cheveu ou un fil métallique très fin. $A\,A'$ est l'ombre géométrique.

On observe en $A'\,C'$ et en $A\,C$ des *franges extérieures*, lesquelles sont identiques avec les franges de l'expérience précédente, quand le fil a plusieurs millim. de largeur.

Entre A et A', au dedans, on observe des franges intérieures plus serrées.

651. *Ouvertures étroites.* On place à une certaine distance de la lentille une feuille métallique, dans laquelle on a pratiqué une ouverture rectangulaire, étroite et parallèle à la ligne lumineuse du foyer de la lentille cylindrique.

La *fig.* 26, p. 17, représente les franges observées; le faisceau est dilaté; à droite et à gauche se trouvent les franges alternativement sombres ou brillantes. On peut observer des franges du neuvième ordre.

Les franges plus larges de la lumière rouge sont marquées R; celles de la lumière violette, plus étroites, sont marquées V.

La distance du point lumineux à l'ouverture et la grandeur de celle-ci sont les élémens dont dépendent la grandeur et le nombre des franges et la courbure des hyperboles, suivant lesquelles elles se propagent.

Ces trois genres d'expériences ont été découverts par Grimaldi (*Phys. Mat., De lumine, etc.*, 1665).

Surfaces polies très étroites. Un miroir poli, recevant un faisceau lumineux, présente le phénomène d'écran, s'il est large, et ceux des ouvertures, s'il est étroit.

Surfaces striées. La lumière réfléchie par ces surfaces striées donne des franges sombres et brillantes, avec une seule couleur, ou diversement nuancées avec la lumière ordinaire.

Les vives couleurs de la nacre de perle sont dues à la même cause. C'est bien l'irrégularité de la surface qui produit le phénomène, puisque si l'on prend, comme l'a fait M. Brewster, l'empreinte d'une surface de nacre sur de la cire à cacheter celle-ci donne les mêmes couleurs.

Newton, qui s'est occupé après Grimaldi de la diffraction, n'a pas connu les franges intérieures.

651. Il est difficile d'expliquer les franges dans le système de l'émission; car dans ce système, il semblerait que la nature et la forme du corps devraient avoir une influence. Cependant des expériences précises prouvent que les bandes diffractées ont le même éclat et la même disposition, soit qu'elles aient été produites par le dos ou par le tranchant d'un rasoir (Fresnel) ou par une matière quelconque.

La courbure des franges ne paraît pas non plus se concilier avec le même système.

Young (*Trans. phys.* 1803) a démontré que le concours de deux faisceaux lumineux est nécessaire pour la formation des franges intérieures, en interceptant par un écran toute la lumière qui vient d'un des côtés du corps étroit, et en faisant disparaître complètement, par cette interposition, les franges intérieures. Dans l'hypothèse de l'émission, chaque faisceau répandant dans l'intérieur de l'ombre une lumière continue; la réunion de deux faisceaux devrait également le produire, si ces faisceaux mélangeaient simplement, et n'exerçaient aucune influence l'un sur l'autre.

Une autre expérience du même savant démontre encore l'influence mutuelle de deux rayons lumineux; si l'on fait passer la lumière d'un point radieux par deux trous très rapprochés, et percés dans une feuille de métal, on observe, dans la partie où les deux cônes se pénètrent, des lignes obscures et des lignes brillantes, résultant évidemment de l'action de ces deux faisceaux l'un sur l'autre, puisqu'elles disparaissent dès qu'un des trous est bouché.

Les franges sont plus nettes quand, au lieu de deux petits trous, on pratique dans la feuille deux fentes parallèles et distantes d'un ou de deux millimètres. On fait encore disparaître les franges intérieures en bouchant l'une des fentes.

Young avait expliqué la formation des franges extérieures par l'interférence des rayons directs et des rayons réfléchis sur les bords. L'expérience du rasoir, rapportée plus haut, est contraire à cette explication.

652. Fresnel, pour expliquer ces franges, admet le principe suivant, dû à Huygens :

Les vibrations d'une onde lumineuse dans chacun de ses points, peuvent être regardées comme la résultante des mouvemens élémentaires qu'y enverraient au même instant, en agissant isolément comme centres d'ébranlement, toutes les parties de cette onde, considérées dans l'une quelconque de ses positions antérieures.

Soient donc C un point lumineux, $M A N$ une portion de l'une des ondes envoyées par ce point; la vitesse produite en un point B (*fig.* 27, pl. 17), quand cette onde y passera, sera la même que la résultante des actions de tous les points de cette onde supposée dans une quelconque de ses positions antérieures.

Les considérations suivantes vont montrer qu'il suffit de tenir compte des parties voisines du point A, situé sur la ligne $C A B$ qui joint le point lumineux C au point B dont il est question.

En effet, prenons trois points a, b, c, de manière que $b B - a B$ soit égal à $c B - b B$, et à une demi-ondulation. Vu l'obliquité des lignes $a B$, $b B$ et $c B$, et la petitesse d'une demi-ondulation par rapport à leur longueur, les deux arcs $a b$ et $b c$ sont presque égaux, et les rayons qu'ils envoient au point B sensiblement parallèles; mais comme les rayons de $a b$ sont en discordance d'une demi-ondulation avec les rayons de $b c$, ils se détruiront. Il en serait de même des rayons pris au delà de c. Ainsi, la résultante des actions sur le point B se réduit à la résultante des actions des points voisins de la ligne qui joint ce point au point lumineux. Quand le mouvement de l'onde est libre, toutes les résultantes doivent être égales pour des points équidistans du point lumineux. La lumière est uniforme, et il n'y a aucun phénomène particulier.

Mais s'il y a un écran $A S$, qui intercepte la portion $A M$ de l'onde, alors l'uniformité de la lumière disparaîtra, mais ce ne sera que pour des points peu éloignés de la ligne $C B$. En effet, soit un point U (*fig.* 28), situé de manière que la ligne $C E U$ perce l'onde à une distance un peu notable du bord de l'écran $A S$, il suit de ce qui vient d'être dit que la lumière sera uniforme en U, les bandes diffractées ne doivent donc s'étendre qu'à une faible distance du bord de l'écran. Soit maintenant un point B', voisin de B; la lumière qui y arrivera sera modifiée par la présence de l'écran.

Pour connaître la cause de cette modification, supposons qu'on décrive du point B une circonférence de cercle avec $B A$ pour rayon, et qu'on prenne les lignes $a B$, $b B$, $c B$, etc., telles que deux parties consécutives dans la série $a f$, $b g$, $c h$, etc., diffèrent d'une demi-ondulation. Cette construction montre que : 1° $a b$ sera plus grand que $b c$, $b c$ plus grand que $c d$, et ainsi de suite.

2° Les points compris entre a et A exercent des actions conspirantes sur B : de même pour les points compris entre a et b, etc. Mais les premiers points seront discordans avec les seconds, ceux-ci le seront avec les suivans, etc. L'action du premier arc $A a$ l'emportera sur celle du second, celle-ci sur celle du troisième, etc., parce que le premier arc est plus grand que le second, et agit moins obliquement, etc. On voit donc que c'est le premier arc qui détermine le sens de la résultante; en sorte que si cet arc était supprimé, le point B vibrerait en sens opposé. Ainsi, l'action du premier arc est supérieure à celle de la somme de

tous les autres. Il en est de même d'un arc quelconque par rapport aux suivans.

Représentons maintenant par l'unité la quantité de lumière qu'envoie chaque moitié de l'onde $M A N$. Si le bord de l'écran est en a, le point B recevra I de lumière, plus celle qu'envoie l'arc $A a$, qui est plus grande que I d'après ce qu'on vient de voir. Ainsi, le point B reçoit plus de lumière par la présence que par l'absence de l'écran.

Si l'écran est en b, l'arc $a b$ qui est de signe contraire à $A a$, diminuera l'action de ce dernier, en sorte que le point B recevra moins de lumière que dans le cas précédent, et ainsi successivement. Si l'on remarque que la ligne $C a + A B$ diffère de $C B$ d'une demi-ondulation, $C b + b B$ de deux demi-ondulations, etc., on reconnaîtra que les franges brillantes correspondent aux points pour lesquels la ligne brisée qui joint le bord de l'écran au point lumineux et au point B surpasse d'un nombre impair de demi-ondulations, la ligne droite qui joint le point lumineux au point B.

Les franges brillantes du premier ordre correspondant à 1/2 ondulation; celle du deuxième à 3/2, etc.

Pour les franges obscures, la différence dont il vient d'être question correspond à un nombre pair de demi-ondulations. Les franges obscures du premier ordre correspondront à 2/2 ondulation; celles du deuxième ordre à 4/2 ondulations, etc., ou, en d'autres termes, l'écran $A S$ conservant une même position (le bord en a), les points $B B''$ pour lesquels $C a B - C B = 1/2 \lambda$, $C a B'' - C B'' = 3 \frac{\lambda}{2}$, etc., seront des franges brillantes, et les points B', B'' pour lequels $C a B' - C B' = 2 \frac{\lambda}{2}$; $C a B''' - C B''' = 4 \times \frac{\lambda}{2}$, correspondront à des franges brillantes.

653. *Franges intérieures des écrans très étroits* (1 à 2mm). F est le foyer de la lentille, $E E'$ l'écran, $N N'$ l'onde incidente, $B B'$ l'ombre géométrique (*fig.* 29); soient, pris dans la partie $N E$, des points a, b, c..., tels $P a - P E = P b - P a = P c - P b =$ une demi longueur d'ondulation. Dans l'autre moitié des points $a' b' c'$..., tels que $P a' - P E' = P b' - P a' =$ une demi-ondulation. La quantité de lumière envoyée au point P, par chacune des parties de l'onde, dépend évidemment des distances $P E$ et $P E'$ et de l'obliquité des arcs.

Les arcs $E a$ et $a b$, sont inégaux, et inégalement inclinés sur la ligne $P E$, conséquemment leur effet ne peut pas être nul sur le point P. Il en sera de même de tous les arcs, jusqu'à ceux qui seront assez inclinés pour que la différence des actions de deux arcs consécutifs puisse être considérée comme nulle. Représentons par $P r$ la résultante de la portion $E N$, et par $P r'$ la résultante de $E' N'$.

La quantité de lumière que recevra le point P dépend de la largeur et de la distance de l'écran au point lumineux, et de la position de ce point P. En effet, on voit d'abord que la résultante $P r$ s'éloignera d'autant plus de $P E$ que ce point P s'approchera plus de B, limite de l'ombre géométrique.

On voit encore que le point P restant le même, la résultante sera d'autant plus près de $P E$ que le point lumineux sera plus près de l'écran.

Ce que nous venons de dire s'explique aussi à la seconde portion de l'onde $E' N'$, dont la résultante est $P r'$; seulement cette résultante s'éloigne de $P E'$, quand P se rapproche du bord B, et réciproquement.

Maintenant, il y aura lumière en P, quand ces deux résultantes seront concordantes, et obscurité quand elles seront discordantes.

Pour tous les points de $F M C$ il y aura concordance. Donc ces points seront sur une frange brillante; ainsi si cet écran est une petite lame circulaire de métal, il y aura dans le centre de l'ombre un point brillant, conséquence de la théorie précédente indiquée à Fresnel par M. Poisson; ce qui a été vérifié par une expérience de M. Arago. A droite et à gauche de cette frange centrale brillante, il y aura des franges alternativement obscures ou brillantes.

Si l'écran n'est pas assez étroit pour que l'onde qui rase l'un des bords exerce une action sur l'onde qui rase l'autre bord, les *franges extérieures* sont identiques avec les *franges extérieures* des écrans. Dans le cas contraire, elles présentent des anomalies plus ou moins extraordinaires.

Les fils métalliques très fins rentrent dans les écrans très étroits.

654. *Les petites ouvertures.* Ce sujet présente trois cas à considérer. Selon la grandeur de l'ouverture, on pourra n'observer que des franges extérieures ou des franges intérieures, ou tout à la fois les unes et les autres.

Les *franges extérieures* sont obtenues avec des ouvertures très étroites.

Prenons un point P sur l'axe $F M P$ (*fig.* 30, pl. 17), tel que $P B - P M =$ une demi-ondulation; il n'y aura pas au delà du point P, des franges intérieures sombres, puisque toutes les lignes $P' B$ et $P' M$ différeront moins d'une demi-ondulation.

Si, sur $X X'$ perpendiculaire à $F P$, on prend des points O, O'.., tels que $O B' - O B$ soit égal à deux demi-ondulations, $O' B' - O' B$ égal à quatre demi-ondulations, etc., tous les points O, O', O''..., seront les points correspondans des franges obscures. En effet, divisons $B B'$ successivement en 2 parties, en 4 parties, etc., il est clair que, dans le premier cas, la résultante des actions de l'onde sur le point O sera nulle, qu'il en sera de même pour O', O''... Ainsi, tous les points O, O', O'', O'''... correspondront à des franges ob-

scures; on démontrerait de même que tous les points $b\ b'\ b''$ pour lesquels la différence $b\,B$ et $b\,B'$, $b\,B'$ et $b'\ B'$ serait égale à 3, à 5 et demi-ondulations, correspondront à des points brillans.

Les franges sombres de divers ordres se meuvent suivant des hyperboles dont les foyers sont B et B', et dont les grands axes ont 2, ou 4 ou 6 et demi-ondulations.

Franges intérieures. Nous avons vu qu'au delà du point P il n'y aura pas de franges intérieures; mais en deçà il y a des franges brillantes obscures. En effet, tous les points $O\ O'\ O''\ O'''$ de l'axe FP pour lesquels $O\,B - O\,M$ ou $O\,B' - O\,M$, $O'\,B - O'\,M$ ou $O'\,B' - O'\,M$, etc., sont successivement égales à 2, à 4... demi-ondulations, seront les milieux des franges obscures, puisque les ébranlemens qu'ils recoivent de chaque partie $B\,M$ ou $B'\,M$ sont détruits. Les points $b\ b'\ b''$ pour lesquels $b\,B - b\,M$ ou $b\,B' - b\,M$ $b'\,B - b'\,M$ ou $b\ B' - b'\,M$... seront 3,5... demi-ondulations correspondront aux milieux des franges brillantes.

Il se produira des franges *extérieures* et des franges *intérieures*, quand l'ouverture sera assez large pour donner naissance à des franges intérieures, et assez étroite pour que la portion de l'onde qui rase un des bords ait une action sensible dans l'ombre de l'autre bord.

La forme des ouvertures détermine celle des franges. Une ouverture circulaire donne des franges annullaires. Des ouvertures de formes plus compliquées fourniront des franges plus compliquées : la théorie en resterait la même.

655. *Effets produits par les réseaux.* La transmission de la lumière à travers des réseaux formés, soit par des fils parallèles très fins, séparés par des intervalles très petits, soit par une lame diaphane, sillonnée de traits très fins, donne naissance à de très beaux phénomènes, dont l'explication rentre dans la théorie générale que nous venons d'exposer, et dont l'observation a été faite par Fraunhofer.

Quand on ne veut juger ce phénomène que d'une manière générale, on reçoit dans une chambre obscure, par une fente étroite, un rayon solaire qu'on observe sur un carton après le passage à travers le réseau. Au centre est une image blanche de la fente (*fig.* 31, pl. 17); de chaque côté tout est nécessairement symétrique. Après l'espace noir A, se trouve un spectre ayant le violet en dedans et le rouge en dehors; à ce spectre coloré succède un espace noir, etc.

Mais si l'on veut observer les raies des différens spectres, il faut faire usage d'une bonne lunette. On obtient ainsi l'intervalle entre une raie et l'axe du faisceau.

M. Babinet a proposé un moyen fort simple qui dispense d'une lunette (*Ann. de Chim. et de Phys.*, t. 40). Il emploie deux ouvertures pour éclairer le même réseau. Il fait varier la distance du réseau aux ouvertures, ou l'intervalle de celles-ci, jusqu'à ce qu'il obtienne la coïncidence des mêmes raies de spectres de même ordre, produits l'un à droite de l'ouverture de gauche, l'autre à gauche de l'ouverture de droite. La distance du réseau aux ouvertures et l'intervalle de celle-ci étant connus, il détermine facilement l'angle du rayon de la raie avec l'axe du faisceau.

Fraunhofer a découvert : 1° que la déviation des mêmes couleurs est en raison de la somme de la largeur, qui comprend dans le réseau un intervalle obscur et un intervalle transparent ; 2° que la déviation d'une couleur dans un spectre quelconque, est proportionnelle au rang du spectre.

Voici l'explication de ces phénomènes, d'après M. Babinet. Soit S un point lumineux (*fig.* 32, pl. 17); soient $a\,b$, $c\,d$, $e\,f$..., les parties opaques, $c\,b$, $d\,e$, $f\,g$..., les parties transparentes du réseau $R\,R'$ sur lequel tombe la lumière, C la position de l'œil. Le phénomène dépend de la grandeur des intervalles égaux $a\,c$, $c\,e$... composés d'une partie opaque et d'une partie transparente. Prenons un de ces intervalles $h\,k$, de manière que la différence des lignes $h\,C$ et $k\,C$ soit égale à une ondulation λ de la lumière homogène qu'émet le point S. Décrivons du point C un cercle avec $h\,C$ pour rayon, $k\,s$ exprimera le retard de $k\,C$ sur $h\,C$. Si l'intervalle $h\ k$ était libre, il est visible qu'aucun rayon de cet espace n'arriverait à l'œil; en effet si l'on divise $h\,k$ en deux parties égales, supposons que u soit le milieu, tous les rayons de la partie $u\,k$ arrivant au point seront en retard d'une demi-ondulation sur ceux de la partie $h\,u$, et seront détruits par ceux-ci. Si nous rétablissons la partie opaque $i\,k$, les rayons de la partie $h\,i$ arriveront seuls en C et y porteront une lumière d'autant plus vive, que $k\,i$ approchera plus d'être égal à $h\,i$. Pour déterminer l'angle que fait le rayon $h\,C$ avec le rayon direct, il suffit de remarquer que le triangle $d\,C\ k$ et le triangle $h\ k\ s$ sont semblables. On aura donc $\frac{d\,k}{C\,k} = \frac{k\,s}{h\,k} = \sin.\ d\,C\,k = \sin.$ d, d'où $\sin.\ d = \frac{\lambda}{c}$; c étant égal à $h\,k$. Pour un spectre du rang m, on aurait $\sin.\ d = \frac{m\lambda}{c}$. On voit que les rayons pour lesquels λ est le plus grand, c'est-à-dire les moins réfrangibles, seront le plus deviés, c'est ce qu'indique l'expérience.

Ces expériences sont très propres à faire connaître la longueur λ pour chaque couleur, puisqu'on peut déterminer d et c avec une grande précision. En effet, on connait le nombre des raies et l'intervalle total qui les comprend, par l'opération même qui a servi à les tracer.

Nous avons déjà indiqué un moyen de déterminer d; en voici un autre très facile à exécuter. Pour cela, soit une petite ouverture S, verticale dans une plaque $M\,N$ de métal (*fig.* 33), soit en R un réseau vertical, qui jettera le premier spectre

de droite sur un petit repère V' (une aiguille ou un fil vertical), c'est-à-dire qu'on éloignera ou l'on approchera le réseau jusqu'à ce que cette coïncidence soit obtenue. On pourra répéter l'expérience sur le repère V' à gauche, ou mesurer les distances VS ou VV' et RS; ce qui fournit RV, et conséquemment sin. d. Nous supposerons $e = \frac{1^{mm}}{50}$, ainsi l'on a λ.

656. Fresnel, pour mesurer la largeur des franges, c'est-à-dire les distances entre les milieux des bandes obscures ou brillantes, emploie une petite loupe mobile, portant à son foyer un fil très fin, qui sert de point de mire, et dont il évalue les déplacemens à l'aide d'un vernier ou d'une vis micrométrique. Cet appareil est un micromètre. Celui dont il est ici question se compose d'une plaque en cuivre glissant à frottement entre deux rainures fixes. Cette pièce est percée d'un trou d'un centimètre de largeur, sur les bords duquel est fixé d'un côté un fil de soie écrue, servant de point de mire, et de l'autre un tuyau portant une loupe, qu'on peut approcher ou éloigner du fil jusqu'à ce qu'il soit à son foyer. La plaque en cuivre est liée à une vis dont le pas a une grandeur bien connue. L'on estime les subdivisions à l'aide d'un cadran divisé en cent parties; en sorte qu'on peut observer des centièmes de millimètre si le pas de la vis est égal à un millimètre.

657. Nous rapporterons une expérience de M. Arago, bien propre à montrer l'influence des chemins parcourus sur la concordance des rayons.

La bande centrale correspond à l'arrivée simultanée des rayons partis en même temps du point lumineux; ces rayons ont donc, dans le cas ordinaire de l'appareil, parcouru des chemins égaux; mais si l'un des faisceaux rencontre sur son passage une lame mince, d'un corps plus réfringent que l'air, il arrivera plus tard à l'ancien point de concours, lequel ne sera plus le milieu de la bande centrale; celle-ci se rapprochera du faisceau qui a marché le plus lentement, et réciproquement lorsque les franges sont portées à droite ou à gauche, on en conclut que le faisceau, du côté duquel les franges se sont portées, a été retardée dans sa marche. Il suit de cette expérience, que la lumière se propage plus vite dans l'air que dans les corps plus réfringens que ce fluide, résultat opposé à la théorie de l'émission. On peut tirer du déplacement de la bande centrale, l'indice de réfraction de la lame diaphane par rapport à l'air. Pour cela, il faut bien se rappeler que la bande centrale correspond au concours des rayons qui ont marché pendant des temps égaux, ou qui ont fait des nombres égaux de vibrations.

Soit e l'épaisseur de la lame transparente, l l'indice de réfraction pour le passage de l'air dans la substance, λ et λ' les longueurs d'ondulation, λ qui est relatif à l'air, étant connu; n' le nombre des longueurs λ' contenues dans e, n le nombre de longueurs λ contenues dans une épaisseur égale d'air; enfin m, le nombre de franges parcourues par la bande centrale, pour passer, de la position qu'elle occupait avant l'interposition de la lame, à la position qu'elle occupe maintenant. On aura évidemment $e = \lambda n = \lambda' n'$ et $n' = n + m$, $l = \frac{\lambda}{\lambda'} = \frac{n'}{n}$, d'où $l = 1 + \frac{\lambda m}{e}$. Ainsi, quand e sera connu, on obtiendra l'indice l, ou réciproquement. On estimera e par le sphéromètre, et m par la vis micrométrique.

Ce procédé a eu surtout le grand avantage de faire apprécier des différences entre les vitesses de la lumière, dans les milieux où elles échapperaient à tout autre moyen d'observation.

Pour donner une idée de la délicatesse de ce procédé, il suffira de remarquer que la longueur des ondulations des rayons jaunes (les plus baillans du spectre) dans l'air est de $0^{mm},00055$; ainsi il y en a 2,000,000 dans $1^m,10$; car $\frac{1^m,10}{0^{mm},00055} = 2{,}000{,}000$. Or, il est aisé d'apercevoir une différence de 1/5 de frange, qui répond à un retard ou à une accélération de 1/5 d'ondulation dans la marche de la lumière; et comme il y en a deux millions dans $1^m,10$, le 1/5 d'une ondulation ne serait que la dix-millionième partie de cette longueur. MM. Arago et Fresnel, en faisant passer la lumière à travers un tube à $1^m,10$, rempli successivement d'air sec et d'air saturé à 30°, ont reconnu que la vapeur d'eau possède un pouvoir réfringent supérieur à celui de l'air. Cette différence serait inappréciable par tout autre procédé, parce que le pouvoir réfringent plus grand de la vapeur d'eau est presque exactement compensé par la moindre densité de l'air humide.

Anneaux colorés.

658. On fera d'abord l'exposé expérimental des phénomènes connus sous le nom d'*anneaux colorés*. On indiquera ensuite l'explication de ces phénomènes, 1° dans le système de l'émission telle qu'elle a été proposée par Newton, 2° dans le système des ondes.

Si l'on reçoit un faisceau élémentaire dans une chambre obscure, et qu'on le dirige sur une lentille placée d'avance sur un verre plan, on observera les faits suivans (*fig.* 465).

L'œil étant tellement situé qu'on ne reçoive que la lumière transmise par réflexion, on verra une tache noire au point de contact des deux verres; cette tache sera environnée d'un anneau coloré,

après lequel viendra un anneau obscur; à celui-ci succédera un anneau coloré, et ainsi de suite. Quelle que soit la couleur du faisceau soumis à cette épreuve, on observera la succession des anneaux colorés ou obscurs.

Si l'on se place de manière à recevoir la lumière par transmission, la couleur observée au point de contact sera celle du faisceau élémentaire; viendra ensuite un anneau obscur; puis un anneau coloré, etc. (*fig.* 474).

Pour obtenir un faisceau élémentaire, on fait arriver un faisceau solaire sur un prisme convenablement disposé, et l'on intercepte, au moyen d'un carton, toutes les couleurs, à l'exception d'une seule. Ou bien, ce qui est plus simple, on fait passer la lumière solaire à travers un verre coloré.

659. Il serait presque impossible de mesurer directement les épaisseurs des lames d'air qui fournissent les différens anneaux, tant obscurs que colorés; mais heureusement la connaissance des diamètres suffit pour trouver les épaisseurs. En effet, soit $M\,C\,N$ le verre plan (*fig.* 471), $E\,C\,A$ la base inférieure du verre convexe, dont le diamètre est $C\,D$; si l'on considère deux anneaux dont les rayons soient $B\,A$ et $F\,G$, les épaisseurs correspondantes des lames d'air seront $C\,B$ et $C\,F$. Or, par une propriété connue du cercle, on a $B\,D \times C\,B = B\,A^2$; $F\,D \times C\,F = F\,G^2$, d'où $C\,B : C\,F :: B\,A^2 : F\,G^2$; car les lignes $B\,D$ et $F\,D$, différant peu entre elles et étant facteurs, peuvent être supprimées sans altérer le rapport. Il résulte de ce calcul que les épaisseurs des lames d'air sont comme les carrés des diamètres des anneaux. Newton mesura ceux des anneaux colorés réfléchis : il trouva que les carrés en étaient comme les nombres 1, 3, 5, 7, etc.

Les carrés des diamètres des anneaux colorés transmis furent trouvés dans le rapport des nombres 2, 4, 6, 8, etc. Il s'en suit que les épaisseurs des lames d'air propres à laisser réfléchir une même couleur, suivent entre elles les rapports 1, 3, 5, 7, 9, etc., et que les épaisseurs de celles qui sont propres à la transmettre sont dans les rapports 2, 4, 6, 8, 10, etc., série dans lequelle il faut comprendre l'épaisseur nulle du centre, la couleur étant toujours transmise au point de contact des verres. Tous ces nombres sont relatifs aux points les plus brillans ou les plus obscurs.

Les rapports sont les mêmes pour toutes les couleurs et pour toutes les substances : seulement pour chaque couleur et pour chaque substance, la valeur absolue d'une épaisseur d'un rang déterminé est exprimée par un nombre particulier. Ainsi les anneaux formés par la couleur rouge ont les diamètres sensiblement plus grands que ceux que forme la couleur violette.

660. Si l'on expose l'appareil à la lumière naturelle, les diverses couleurs simples forment toutes à la fois leurs anneaux; mais ces anneaux, ayant des diamètres inégaux, anticipent les uns sur les autres, ce qui produit les séries successives des cercles colorés. Ils diminuent d'intensité à mesure qu'on s'éloigne du centre, et finissent par ne plus être aperçus par l'œil. On s'assure cependant de leur existence en les regardant à travers un prisme, parce que ceux qui étaient trop rapprochés étant inégalement déplacés par l'effet de la réfraction, se trouvent suffisamment déplacés pour être distincts les uns des autres.

661. Par le calcul ci-dessus et par la connaissance du diamètre de la sphère à laquelle appartient le verre convexe, on détermine la valeur absolue d'une épaisseur pour une couleur soumise à l'expérience. En effet une épaisseur $C\,B = \frac{B\,A^2}{B\,D}$, $B\,A$ est le demi-diamètre de l'anneau qu'on mesure directement, et $B\,D$ est très peu différent du diamètre de la sphère à laquelle appartient la lentille. C'est ainsi que Newton a trouvé que pour un verre convexe appartenant à une sphère dont le diamètre était égal à 182 pouces, le premier anneau obscur correspond à une épaisseur de 1/88730 de pouce.

662. En regardant les anneaux colorés produits par une lame d'eau, on a fait une remarque importante; c'est que les diamètres de ces anneaux ne varient pas d'une manière très sensible avec l'inclinaison des rayons qui les produisent, tandis que ceux des anneaux formés par une lame d'air diminuent à mesure que l'obliquité devient plus grande. On se rend raison de cette différence en faisant attention que le rayon de lumière qui arrive sur la lame mince, sort du verre et s'écarte peu de sa direction primitive quand il traverse une lame d'eau, de sorte que le chemin parcouru entre les deux verres sera à peu près le même, quelle que soit l'inclinaison; et comme c'est le chemin parcouru qui détermine la production de telle ou telle couleur, on voit que cette dernière devra peu varier avec l'obliquité des rayons, tandis que par une lame d'air le rayon s'écarte beaucoup de sa direction primitive, en s'éloignant de la perpendiculaire, ce qui fait qu'il devient plus oblique, et que pour qu'il parcoure le même chemin entre les deux verres, il faut qu'il les traverse plus près du point de contact, ce qui diminue le diamètre des anneaux colorés.

663. Newton appelle *accès de facile réflexion* les dispositions successives et périodiques d'un même rayon à être refléchi par les différentes épaisseurs d'une lame d'une substance quelconque; et *accès de facile transmission* les dispositions d'un même rayon à être transmis par les épaisseurs intermédiaires. Ainsi, en appelant e la plus petite épaisseur d'un corps capable de réfléchir le rayon jaune, ce rayon est dans un accès de facile réflexion pour toutes les épaisseurs $3\,e$, $5\,e$, $7\,e$, etc. De même il est dans un accès de facile transmission lorsque

l'épaisseur de la lame qui le reçoit est dans la série $2e$, $4e$, $6e$, etc. C'est là seulement l'énoncé du fait.

664. L'explication des anneaux colorés dans le système des ondes paraît plus naturelle. En effet, on sait que lorsqu'un faisceau de lumière SI tombe sur une lame transparente, il éprouve une réflexion partielle à la première surface, une autre à la seconde, et qu'enfin une troisième portion traverse la lame (*fig.* 476). Les deux rayons $i'C$ et $C'i'$, réfléchis l'un par la première surface, l'autre par la seconde surface, sont évidemment parallèles. Les intensités de ces deux lumières réfléchies sont peu différentes à cause de la faible épaisseur de la lame traversée. Si les deux systèmes d'ondulations coïncident, il y aura augmentation de lumière; s'ils sont en retard d'un nombre impair de demi-oscillations, il y aura obscurité. Ne considérons, pour plus de simplicité, qu'une seule couleur élémentaire, par exemple la lumière violette. Le faisceau réfléchi à la seconde surface se trouve en retard d'une quantité proportionnelle au double de l'épaisseur qu'il a traversée deux fois.

e désignant l'épaisseur, $2e$ est le chemin parcouru par le rayon réfléchi à la seconde surface; si λ est la longueur d'une ondulation dans l'air, il y a obscurité pour $2e = \frac{\lambda}{2}$, c'est-à-dire pour une épaisseur $e = \frac{\lambda}{4}$; de même pour $2e = \frac{3\lambda}{2}$, ou $e = \frac{3\lambda}{4}$, et ainsi de suite; de sorte que toutes les épaisseurs pour lesquelles il y aura obscurité sont $\frac{\lambda}{4}$, $\frac{3\lambda}{4}$, $\frac{5\lambda}{4}$, $\frac{7\lambda}{4}$, et en général pour une épaisseur égale à un multiple impair de $\frac{\lambda}{4}$..... Il y aura lumière pour $2e = 2 \times 1/2\lambda$ ou $e = 2/4\lambda$, de même pour $2e = 4 \times 1/2\lambda$ ou $e = \frac{4\lambda}{4}$ et en général pour une épaisseur égale à un multiple pair de $\frac{\lambda}{4}$. Il résulte de ce qui précède, que les épaisseurs correspondantes à des anneaux lumineux par réflexion, seront entre elles dans le rapport des nombres 0, 2, 4, 6, tandis que celles qui correspondent aux anneaux obscurs seront dans celui des nombres 1, 3, 5, 7. On trouve de la même manière l'explication des anneaux transmis; en effet, une portion qui tombe sur une lame transparente la traverse directement, une autre la traverse après deux réflexions dans son intérieur. Ces deux faisceaux sont parallèles; ils s'ajouteront ou se détruiront suivant qu'il y aura concordance ou discordance entre les ondes qui les produisent.

Il est clair que l'obscurité ne doit pas être complète parce que les rayons réfléchis à la seconde surface ont éprouvé une perte. Il en est de même des rayons transmis après deux réflexions dans l'intérieur comparativement à ceux qui sont immédiatement transmis; jamais pour la même raison il n'y a d'accord parfait. Voilà pourquoi l'on observe non des anneaux sans épaisseurs, mais des surfaces annullaires.

665. Maintenant si nous examinons les nombres donnés par la théorie pour les épaisseurs des lames, nous voyons qu'ils sont l'inverse de ceux que fournit l'expérience. Ainsi, nous avons trouvé 1, 3, 5. 7, etc., pour les épaisseurs qui donnent des anneaux obscurs par réflexion, c'est le contraire de l'expérience : ces épaisseurs correspondent aux anneaux lumineux. De même 2, 4, 6, etc., d'après la théorie, correspondent aux anneaux éclairés; l'expérience montre que ce sont les épaisseurs des anneaux obscurs.

Young a levé cette difficulté ainsi qu'il suit. Lorsqu'une bille en mouvement rencontre une autre bille égale, en repos, elle lui communique tout son mouvement et reste en repos. Si la seconde bille a moins de masse, la première se meut toujours dans le même sens, mais avec moins de vitesse; si elle a plus de masse, la première prend un mouvement en sens contraire. Ainsi les vitesses de la première bille après le choc sont de signes contraires dans les deux derniers cas. Appliquons les notions à la propagation de l'éther.

Dans un milieu d'une densité iniforme, une tranche d'éther met la tranche suivante en mouvement et prend l'état de repos.

Si la lumière passe d'un milieu dans un autre, les choses se passent comme entre des billes de masses inégales; de sorte que la tranche infiniment mince du premier milieu qui touche au second, et qu'on peut assimiler à la première bille en mouvement, ne reste pas en repos après avoir mis en mouvement la tranche contiguë du second milieu, à cause de la différence de leurs masses; si elle est moins dense que la tranche qui la suit, elle prendra sur-le-champ un mouvement en arrière qui se communiquera aux couches précédentes, il y aura réflexion. Si elle est, au contraire, plus dense, elle conservera un mouvement en avant qui sera suivi d'un mouvement en arrière, en sorte que ce ne sera qu'au bout d'une demi-ondulation qu'elle agira sur les tranches précédentes, comme elle agissait sur-le-champ dans l'autre cas; il y aura donc encore réflexion; mais les mêmes oscillations dans le rayon réfléchi auront lieu dans les deux cas à des époques différentes d'une demi-oscillation.

Ces considérations, appliquées à la réflexion de la lumière, apprennent que selon qu'une onde lumineuse est réfléchie en dedans ou en dehors d'un milieu plus dense, il y aura une demi-ondulation de différence dans les deux rayons réfléchis

M. Poisson a été conduit depuis, par l'analyse, à la même conséquence.

Dans les anneaux colorés, les deux systèmes d'ondes qui produisent les phénomènes ont été réfléchis, le premier en dedans du verre supérieur, et le second l'a été en dehors du verre inférieur; il y aura donc, d'après le principe précédent, une ondulation de différence entre ces deux rayons. Il en résulte que des rayons qui s'accorderaient en raison de la différence des chemins parcourus indépendamment de cette considération, seront en opposition en y ayant égard. Conséquemment, partout où il devrait se produire de la lumière, il n'y aura que de l'obscurité, et réciproquement. Ce qui est conforme à l'observation.

666. Par ce qui précède, on voit que le quart d'une ondulation lumineuse $\frac{\lambda}{4} = e$ est précisément la longueur de ce que Newton appelle accès des molécules lumineuses. Ainsi, pour avoir les longueurs des ondulations des sept principales couleurs simples, il faudra multiplier par 4 les nombres qu'il a donnés pour leur accès. On trouve de cette manière les mêmes valeurs qu'en déduisant les longueurs d'ondulation de la mesure des franges produites par les différens procédés indiqués ci-avant.

La théorie précédente montre : 1° que les épaisseurs de deux milieux qui donnent la même teinte, sont comme les longueurs d'ondulation λ et λ', ou comme le sinus d'incidence est au sinus de réfraction lorsque la lumière passe du premier dans le second; 2° que la couleur violette qui a une longueur d'ondulation plus petite que la lumière rouge, doit donner des anneaux plus serrés que cette dernière; tout cela est conforme à l'expérience.

Il existe un grand nombre de phénomènes analogues aux anneaux colorés : ainsi, certaines pierres (l'opale, etc.), qui contiennent des fissures remplies d'air ou de tout autre fluide, offrent des couleurs très variées qui disparaissent par la pulvérisation du corps.

Dans la théorie précédente on a supposé la lame mince moins ou plus réfringente que les deux plaques environnantes; c'est le cas de l'air ou du soufre entre le verre. Mais si la réfringence était intermédiaire, on aurait des anneaux à centre blanc, et les couleurs observées seraient complémentaires de celles qu'on observe dans le cas précédent. C'est ce que M. Arago a constaté depuis long-temps d'après les indications d'Young. Un appareil de M. Babinet est très commode pour cela; il consiste en une légère couche d'essence de girofle placée entre un prisme de flint et une lentille de crown.

667. Quand le rayon incident s'incline sur la lame mince, on voit les anneaux augmenter de diamètre. La théorie exposée rend raison de ce phénomène. Soient $S\,I$ le rayon incident, $I\,S'$ le rayon réfléchi à la première face; $I'\,S''$ celui qui l'est à la seconde; $I'\,C$ une perpendiculaire à $I\,S'$ et $P\,P'$ à $I\,I'$. Soit enfin $P\,P' = e$, on aura $I\,I' = 2\,I\,P' = 2\,e \text{ tang. } r$; $I\,P = \frac{I\,P'}{\sin. r} = \frac{e \text{ tang. } r}{\sin. r} = \frac{e}{\cos. r}$. Appelons λ et λ' les longueurs d'ondulations dans l'air et dans le verre, pour la lumière employée; Q' le quotient de $I\,C$ par λ'; Q celui de $I\,P\,I'$ par λ; on aura

$$Q' = \frac{I\,C}{\lambda'} = \frac{I\,I' \sin. i}{\lambda'} = \frac{2\,e \sin. i \text{ tang. } r}{\lambda'} = \frac{2 \sin. i \sin. r}{\lambda' \cos. r}; \; Q = \frac{I\,P\,I'}{\lambda} = \frac{2\,e}{\lambda \cos. r} \ldots Q - Q' + 1/2$$

sera le nombre d'ondulations dont le second système sera en retard sur le premier. Si l'on met pour Q et Q' leurs valeurs, et qu'on élimine λ' par le moyen de la proportion, $\sin. i : \sin. r :: \lambda' : \lambda$, il restera $Q - Q' + 1/2 = \frac{2\,e \cos. r + 1/2\,\lambda}{\lambda}$, conséquemment $2\,e \cos. r + 1/2\,\lambda$ pour le retard exprimé en longueur d'ondes. Si i augmente, r augmentera aussi, e doit donc augmenter également pour que $2\,e \cos. r + 1/2\,\lambda$ ne change pas.

668. Les couleurs des corps ne sont pas inhérentes à leurs particules; mais elles dépendent de la lumière qu'ils réfléchissent, et ils ne présentent leur couleur que lorsqu'ils sont exposés à la lumière blanche. Dans la lumière rouge ou violette ils paraissent rouges ou violets.

Beaucoup de corps liquides ou solides ont la même couleur par réflexion que par transmission. Quant à ceux qui laissent passer une couleur particulière, ils ont dû absorber les couleurs complémentaires.

Nous citerons quelques faits particuliers, qui se rattachent à ce sujet. Certains oxides métalliques offrent un changement passager de couleur par la chaleur. D'après M. Chevreul l'indigo devient rouge ponceau par la chaleur capable de le volatiliser; M. Thénard a remarqué que le phosphore, distillé plusieurs fois, devient noir par un refroidissement subit.

L'opacité de certains corps tient d'abord à ce que ces corps absorbent et éteignent la lumière; ensuite à la multiplicité des réflexions qu'elle éprouve dans leur intérieur, à cause de la trop grande différence qui existe entre la densité de leurs particules et celle du fluide ou du vide dont elles sont entourées. Une expérience appuie cette explication : qu'on remplisse un verre de morceaux de borax (substance transparente), la lumière ne passera que difficilement à travers la masse. Si l'on y verse de l'huile d'olive, dont la puissance réfrac-

tive est peu différente de celle du borax, le mélange de ce sel et d'huile devient transparent. On doit donner la même explication de l'opacité des nuages, lesquels sont composés de vésicules de vapeur enveloppées d'air.

De l'Héliostat.

669. Dans une infinité d'expériences d'optique, il est nécessaire de donner aux rayons solaires une direction constante. On y parvient en plaçant au volet de la chambre obscure dans laquelle on fait les expériences, un miroir plan dont on change l'inclinaison à chaque instant; on obtient le même résultat d'une manière plus commode par le moyen de l'*héliostat*.

Si la direction du rayon réfléchi coïncidait avec l'axe de la terre, il est visible que le miroir devrait décrire une surface conique droite, dont l'angle au sommet varierait avec la déclinaison du soleil, parce que la courbe apparente décrite par le soleil est un cercle dont le centre est sur l'axe de rotation de la terre. On obtiendrait ce mouvement à l'aide d'une horloge qui ferait mouvoir une aiguille autour d'un cadran parallèle à l'équateur. Le miroir se mouvrait autour d'une ligne placée dans l'axe du cadran, et serait fixé à une tige perpendiculaire à son plan, laquelle serait entraînée par l'aiguille du cadran. Si le rayon réfléchi devait avoir une direction différente, il faudrait le faire réfléchir sur un second miroir fixe. Pour éviter la perte occasionée par deux réflexions on n'emploie qu'un miroir, et, par la disposition suivante, on dirige le rayon solaire parallèlement à une droite quelconque.

Soient $S\,S'\,S''\,S'''$ le cercle décrit par le soleil en 24 heures, $A\,B$ la position du miroir. Les rayons solaires coïncident successivement avec les arêtes de la surface conique $O\,S\,S'\,S''\,S'''$; soient $O\,D$ la direction constante des rayons réfléchis, $O\,E$ une perpendiculaire au miroir, et passant par son centre autour duquel le miroir peut prendre toutes les positions possibles. La droite $O\,E$ divise l'angle $D\,O\,S$ en deux parties égales; et conséquemment la droite $S\,D$ est divisée au point E en deux parties proportionnelles à $S\,O$ et $O\,D$, le point E étant pris dans le même plan, $S\,S'\,S''\,S'''$. Pour un autre rayon solaire $O\,S'$, la perpendiculaire $O\,E'$ divisera de même la ligne $D\,S'$ en deux parties proportionnelles à $S'\,O$ et $O\,D$. Ainsi la queue du miroir rencontrera le plan $D\,S\,S'\,S''$ en des points $E\,E'\,E''$, etc., qui divisent les droites $D\,S$, $D\,S'$. etc., en parties proportionnelles. On sait par la géométrie que ces différens points sont placés sur une circonférence de cercle; d'après cela, la queue du miroir devra décrire en vingt-quatre heures une surface conique oblique dont la base parallèle à l'équateur sera un cercle (*fig.* 479).

On satisfait à cette condition à l'aide de l'appareil *fig.* 480, composé d'un miroir $A\,B$ et d'une horloge M. Le miroir est mobile autour de l'axe $o\,o'$, la tige qui supporte cet axe se meut sur elle-même, l'aiguille du cadran porte une fourche $h\,l$, mobile autour de l'axe u, cette fourche soutient un tuyau dans lequel passe à frottement libre l'axe $o\,o'$. Ce tuyau est mobile autour d'un axe perpendiculaire à sa direction. Le cadran de l'horloge doit toujours être dirigé parallèlement à l'équateur. L'époque de l'année, le lieu de l'observation, règlent le rapport qui doit exister entre la position de l'horloge et celle du miroir.

L'héliostat, d'abord imaginé par S'Gravesande, a été perfectionné par Charles, par Malus, etc. Voy. le *Journal de l'École Polytechnique*, t. 10 et 11, où M. Hachette décrit les différens héliostats. Voyez aussi le *Bulletin de la Société d'Encouragement*, année 1826, pour une description que le même savant a faite d'un nouvel héliostat proposé par M. Gambey.

Comparaison des intensités de deux lumières.

670. On compare les intensités de deux lumières par plusieurs procédés; les suivans sont surtout employés.

Le premier consiste à produire deux intensités égales à l'œil, et à mesurer les distances auxquelles des lumières sont placées. On y parvient en pratiquant dans un carton deux ouvertures, sur chacune desquelles on colle un morceau de papier huilé très mince. On sépare les deux ouvertures et les deux lumières par un écran opaque.

On se place devant le carton, on éloigne ou l'on rapproche les deux lumières, de manière à éclairer également chaque ouverture. Soient D et D' les distances des lumières; soient J et J' les intensités à l'unité de distance : on aura $\frac{J}{D^2} = \frac{J}{D'^2}$; d'où $\frac{J}{J'} = \frac{D^2}{D'^2}$, c'est-à-dire que le rapport des intensités est égal au rapport du carré des distances; ce dernier rapport est connu, la question est donc résolue. (Voyez l'*Optique* de Bouguer.)

M. Ritchie dispose les deux lumières à comparer, chacune à une des extrémités d'une boîte rectangulaire (*fig.* 382), dans laquelle sont placés deux miroirs $A\,B$ et $A\,C$ inclinés de 45° sur l'axe de la boîte; une ouverture $F\,G$ recouverte d'un tissu très fin ou d'un papier huilé reçoit la lumière réfléchie. En o est un morceau de carte noire destinée à prévenir la confusion des rayons réfléchis; on fixe les deux lumières, quand le papier paraît également éclairé de chaque côté de la carte o. La pratique de ce photomètre exige des moyens de vérification que chacun peut facilement imaginer.

Le comte de Rumford a proposé de placer à des distances convenables de chaque lumière, un corps opaque qui projette deux ombres sur un tableau transparent. On se place devant le transparent ; on dispose les deux lumières de manière que les deux ombres soient également éclairées. Chacune des ombres n'est éclairée que par une des deux lumières, tandis que le carton est éclairé par les deux lumières à la fois. On calcule ensuite les rapports des intensités comme dans le procédé précédent. L'inclinaison des rayons lumineux doit être la même sur l'écran.

On pense généralement que l'égalité de deux ombres est appréciée avec plus de justesse que celle de deux lumières; toutefois, quand les lumières ont des teintes différentes, l'estimation devient difficile dans un procédé quelconque.

Ces différens instrumens, proposés pour comparer les lumières sous le rapport de leurs intensités, portent le nom de *photomètres*.

Les procédés photométriques proposés par M. Arago permettent une beaucoup plus grande exactitude. Ces procédés sont fondés sur les principes de la polarisation et des anneaux colorés.

Veut-on juger de l'égalité ou de la faible différence de deux lumières ; on en fait d'abord réfléchir les rayons sur un verre noir, sous l'angle de la polarisation, ou on les fait passer à travers une tourmaline taillée parallèlement à l'axe pour les polariser ; puis on les reçoit sur une plaque de cristal de roche taillée perpendiculairement à l'axe, et de 5mm d'épaisseur, enfin on les regardera avec un prisme biréfringent. Chaque lumière donnera deux images colorées de teintes complémentaires. On amènera l'image rouge de l'une sur l'image verte de l'autre. Cette superposition produira une image blanche, si les deux intensités sont égales, une teinte verdâtre ou rougeâtre indiquera une différence, et de plus celle qui est la plus intense.

C'est ainsi que M. Arago a constaté contre l'opinion de Bouguer, que la lumière des bords du soleil est égale à celle du centre.

Pour estimer le rapport de deux lumières, par exemple, de deux étoiles, M. Arago emploie toujours la superposition des deux images polarisées complémentaires, mais il affaiblit la plus intense par le moyen d'un prisme biréfringent, en sorte que, connaissant l'inclinaison de la section principale sur le plan de polarisation, il peut par la relation $J \cos.^2 \alpha$ (nº 632) trouver le nombre par lequel il faut multiplier cette lumière pour la ramener à son intensité primitive. Il estime encore la différence de deux lumières d'une autre manière. Il colle sur un mur deux feuilles de papier blanc, qu'il éclaire par chacune de ces lumières; puis avec l'appareil des anneaux colorés, il regarde en même temps par réflexion les anneaux produits par l'une des deux lumières ou par le papier qu'elle éclaire, et par transmission les anneaux formés par le papier illuminé par l'autre. S'il n'y a pas de couleur, les lumières sont égales ; s'il subsiste des anneaux, elles sont inégales. Dans le dernier cas on éloignera la plus intense jusqu'à faire disparaître les anneaux, c'est-à-dire jusqu'à ce que les anneaux produits par réflexion soient neutralisés par les anneaux produits par transmission, qu'on sait être complémentaires des premiers.

Nous avons déjà indiqué plusieurs moyens de distinguer la lumière polarisée de la lumière naturelle : 1º au nº 625, caractères de la lumière polarisée, 2º à la polarisation chromatique avec l'appareil de M. Arago, 3º aux cristaux à un axe (nº 642). Nous ajouterons ici l'appareil de M. Savart ; il consiste en deux plaques de cristal de roche, de 2 à 3mm d'épaisseur, obliques à l'axe de 45 à 50 degrés, et croisées à 90º l'une sur l'autre : derrière ces deux lames, et près de l'œil, est une plaque de tourmaline. Cet appareil montre des bandes parallèles et colorées ou plutôt des branches d'hyperboles, quelque faible que soit la polarisation.

Pour trouver le rapport des quantités de lumière polarisée contenues dans deux rayons, M. Arago procède de la manière suivante. Il s'appuie sur le principe démontré par lui, savoir : qu'il se trouve dans un rayon transmis une quantité de lumière polarisée égale à celle qui existe polarisée en sens contraire dans le rayon réfléchi sous la même incidence. Si donc l'intensité du rayon transmis est double ou triple de celle du rayon réfléchi, il se trouvera dans celui-ci une quantité proportionnelle de lumière polarisée double ou triple. Ajoutons qu'on sait par l'expérience, qu'une ou plusieurs plaques mises dans le trajet d'un rayon polarisé, dans une inclinaison convenable, le ramènent à l'état neutre, quelle que soit son intensité. Supposons qu'on connaisse les inclinaisons sous lesquelles cette pile ramène à l'état neutre ou naturel, deux rayons partiellement polarisés, dont les quantités de lumière sont dans un rapport connu ; il est évident que si sous les mêmes inclinaisons cette pile neutralise deux rayons de nature inconnue, les quantités de lumière polarisée de ceux-ci seront dans le même rapport.

Nota. Nous avons omis de rapporter à l'article Polarisation, que M. Forbes a démontré que la chaleur se polarise comme la lumière, et que les expériences de ce savant anglais ont été confirmées par M. Melloni.

Nous avons également omis de mentionner un opuscule dans lequel M. Delezenne a relaté les principales expériences de la polarisation, avec des observations nouvelles.

ACOUSTIQUE.

671. Lorsque les molécules d'un corps solide, liquide ou gazeux, sont dérangées de leur portion d'équilibre, elles tendent à y revenir par une suite d'oscillations isochrones, dont l'amplitude va en diminuant. L'étude de ces vibrations et des phénomènes auxquels elles donnent naissance constitue l'acoustique.

Pour se former une idée des vibrations sonores, qu'on place une cloche de verre entre deux pointes de fer, ou entre deux petites boules métalliques suspendues à un fil de soie ou de lin; en la frottant à l'aide d'un archet, ou en la choquant légèrement avec un corps solide, on verra ces pointes ou ces boules successivement frappées par la cloche. On peut concevoir cette cloche comme formée d'une infinité d'anneaux séparés depuis sa base jusqu'au point culminant. Au moment où la cloche est ébranlée par le frottement de l'archet, ou par le choc qu'elle a éprouvé, chaque anneau prend une figure ovale; le grand axe de cet ovale est évidemment perpendiculaire au sens suivant lequel la percussion s'est faite. Le retour de l'anneau à sa première figure est suivi d'un mouvement en sens contraire, et ainsi de suite. Ces vibrations se communiquent à l'air jusqu'à ce qu'enfin la cloche reprenne l'état de repos. On rend les vibrations plus sensibles en écartant de sa position naturelle une corde fixée à ses deux bouts, ou en posant légèrement le doigt sur un instrument pendant qu'on le joue. Dans ce dernier cas, on sentira un frémissement qui accompagne toujours la production du son.

672. Il y a deux espèces de son, le bruit et le son musical. Le bruit est un choc instantané, communiqué aux particules de l'air; le son musical, au contraire, consiste dans une série de vibrations isochrones qui viennent frapper l'oreille. Il faut distinguer trois qualités dans le son musical : 1° *l'intensité*, qui dépend de l'amplitude des vibrations, comme on peut le voir en passant un archet sur une corde avec plus ou moins de rapidité; 2° *le ton*: c'est cette qualité qui fait qu'un son est plus ou moins grave, et qui dépend du nombre de vibrations exécutées dans un temps donné; 3° *le timbre*, qualité que donne chaque instrument au son qu'il fait entendre. Ainsi il existe une différence appréciable entre la même note excutée sur le hautbois ou sur la flûte.

673. On trouve de la manière suivante que le son est d'autant plus aigu que le nombre des vibrations, dans un temps donné, est plus grand. On fait d'abord vibrer une lame mince d'acier et fixée par une de ses extrémités; pour cela, on l'écarte de sa position, elle y revient par une suite d'oscillations qu'on compte aisément si elle a assez de longueur. En diminuant ensuite la longueur, les vibrations deviendront asses rapides pour qu'on ne puisse plus les compter; mais la longueur de la lame vibrante étant connue, on en déduira le nombre des vibrations effectuées dans un temps donné. En effet, on démontre en mécanique que, pour une lame d'égale épaisseur dans toute sa longueur, la durée de chacune de ses vibrations est en raison directe du carré de sa longueur, conséquemment le nombre des vibrations dans un temps donné est en raison inverse. On trouve ainsi que, lorsqu'une lame commence à rendre un son appréciable, elle fait 32 vibrations par seconde. Le son qu'elle rend alors est le même que celui d'un tuyau d'orgue, de la longueur de 32 pieds, ouvert à ses deux bouts. On verra, à l'article des instrumens à vent, une expérience dans laquelle on fait la même détermination au moyen de la sirène ou du monocorde.

On a constaté avec des expériences analogues aux précédentes que les sons cessent d'être appréciables quand le corps vibrant effectue 8,200 vibrations par seconde.

C'est là ce qui a été admis jusqu'e dans ces derniers temps; mais M. Savart, en augmentant l'amplitude des oscillations, a reconnu que les sons aigus produits par 24,000 oscillations sont encore appréciables; il pense que la limite est encore au delà; il pense également que la limite inférieure est au-dessous de 32 vibrations par seconde. M. Savart détermine avec une grande exactitude, par plusieurs roues qui engrènent les unes dans les

autres, le nombre de vibrations correspondantes à un son donné.

674. La transmission du son ne se fait pas dans le vide. On le démontre en plaçant un mouvement d'horlogerie sous le récipient d'une machine pneumatique : on le fait reposer sur un coussinet rempli de coton ou de laine, afin d'éviter la propagation du son par les corps solides; on fait le vide, et à l'aide d'une tige qu'on enfonce à volonté, on détermine le mouvement du mécanisme. On voit alors, sans rien entendre, le marteau frapper le timbre.

On rend encore l'expérience plus décisive en recouvrant la première cloche d'une cloche semblable, et en faisant le vide entre l'intervalle des deux cloches. Si on laisse rentrer peu à peu l'air dans l'une ou l'autre expérience, le son devient de plus en plus intense.

Il résulte des expériences de Priestley et de M. Pérolle, que l'intensité avec laquelle le son se transmet dans un gaz, est d'autant plus faible que la densité de ce gaz est moindre. Ainsi on entendrait à peine le son du timbre dans l'expérience précédente, si la cloche était remplie d'hydrogène.

675. *Vitesse du son.* La vitesse du son est constante, c'est-à-dire que le son parcourt des espaces proportionnels au temps. Cette vitesse a d'abord été évaluée à 1038 pieds par seconde.

L'incertitude de cette mesure engagea, en 1738, l'Académie des Sciences à entreprendre de nouvelles expériences : elles furent faites entre Montlhéry et Montmartre.

Il est résulté de ces expériences que la vitesse du son est constante, et qu'elle est de 337^m,118 par seconde à la température de 6 degrés, quelle que soit l'intensité du son; qu'elle est sensiblement la même par un *temps pluvieux* que par un *temps serein*. La direction et la force du vent ont une influence; si cette direction concourt avec la direction de la propagation du son, elle augmente la vitesse; si elle est opposée, elle l'affaiblit; enfin, dans le cas où elle lui est perpendiculaire, la vitesse du son n'en est nullement altérée.

Des expériences faites à Gottingue par le major Muller donnent une vitesse un peu plus forte.

Une commission prise dans le sein de l'Académie des Sciences a déterminé de nouveau la vitesse du son dans la nuit du 21 juin 1822 centre Villejuif et Montlhéry. La température de l'atmosphère était de 15,9 degrés. Pour que les résultats ne fussent pas influencés par le vent, les coups de canon des deux stations opposées étaient réciproques; la distance entre les deux stations, déterminée par M. Arago, est de 9549,6 toises. Le temps nécessaire au son pour parcourir cet intervalle a été trouvé de 54'',6, d'où l'on a déduit 340^m,89 pour l'espace parcouru dans une seconde, nombre qui diffère peu de celui qu'avaient obtenu les académiciens en 1738. Par le calcul, ce nombre serait réduit à 337^m,28 pour 10°, et à 331,12 pour 0°. *Voyez*, pour les détails, le rapport de M. Arago (*Ann. de Chim. et de Phys.*, t. 20).

La connaissance de la vitesse du son fournit un moyen d'estimer d'une manière suffisamment approchée, la distance à laquelle on se trouve d'une ville assiégée, d'un fort, etc. Il suffit de multiplier par 340^m le nombre de secondes et de fractions de secondes qui s'écoulent depuis l'instant où l'on aperçoit la lumière de l'explosion du canon jusqu'à celui où le bruit arrive à l'oreille.

676. Il est intéressant de comparer la vitesse calculée à la vitesse observée.

L'expresion donnée par Newton pour la vitesse du son est $\sqrt{\frac{e}{d}}$; e, étant l'élasticité et d la densité du gaz. Si l'on remplace e par une colonne de mercure équivalente $h\,g\,D$ on aura $\sqrt{\frac{h\,g\,D}{d}} = \sqrt{\frac{h\,g}{d : D}} = \sqrt{\frac{h\,g}{d'}}$, d' étant la densité de l'air par rapport au mercure.

Si l'on met à la place de d' sa valeur 1/10463, 0^m,76 pour h, et 9^m,809, pour g, on trouve 279^m,3 pour la vitesse du son à zéro, et sous 0^m,76. Pour une autre température, et une autre pression H', il faudrait remplacer d' par $\frac{d'}{1 + at}$ et 0,76 par H'. On trouve ainsi 286^m,8 pour la vitesse à 16° et à 0^m,756. Ce qui diffère de 54^m de la vitesse observée.

Cette différence entre les expériences précises et une théorie fondée sur les lois de la mécanique, a beaucoup exercé la sagacité des géomètres. Laplace, pensant que la cause principale de cette discordance tient à ce que, dans la propagation du son, la compression du fluide est accompagnée d'un certain dégagement de chaleur, qui augmente l'élasticité dans un plus grand rapport que la densité, a été conduit à l'énoncé suivant : « La vitesse réelle du son est égale au produit de la vitesse que donne la formule newtonienne par la racine carrée du rapport de la chaleur spécifique de l'air sous une pression constante, à la chaleur spécifique sous un volume constant. »

Il n'est pas possible de montrer directement le dégagement de chaleur dans la propagation du son. Mais ce qui rend le dégagement très probable, c'est que la vitesse calculée dans cette hypothèse par Laplace d'une part, et par M. Poisson de l'autre, s'accorde, à quelques mètres près, avec la vitesse observée.

Des expériences de M. Biot sur la transmission du son à travers les vapeurs, indiquent aussi un dégagement de chaleur. Sans ce dégagement de

chaleur, le son ne se transmettrait pas dans ce cas, puisqu'une vapeur saturée doit se condenser par la moindre compression.

677. La forme du radical $\sqrt{\frac{gH}{d}}$ montre que la vitesse est indépendante de la pression, puisque, d'après la loi de Mariotte, $\frac{H}{d}$ est une quantité constante (n° 206). Il est clair, d'après cela, qu'il faut distinguer l'intensité du son de sa vitesse; car il est naturel de penser que l'intensité du son, qui n'est autre chose que la force avec laquelle les particules aériennes frappent l'organe de l'ouïe, doit dépendre de la densité et de la vitesse de ces particules. Cette intensité doit donc s'affaiblir d'autant plus vite, toutes choses égales d'ailleurs, que la couche d'air où le premier ébranlement s'excite, a moins de densité; c'est ce qui est conforme à l'expérience du n° 674 et aux observations de Saussure sur le sommet du Mont-Blanc, où le bruit d'un coup de pistolet ne se fait entendre qu'à une faible distance. M. Gay-Lussac a aussi constaté qu'à la hauteur de sept mille mètres, l'intensité de sa voix était beaucoup affaiblie.

Dans une masse d'air d'égale densité, l'intensité décroît comme le carré de la distance.

La valeur que nous venons de donner est relative à l'air parfaitement sec, ce qui n'a jamais lieu dans la nature; l'air est toujours plus ou moins chargé de vapeur. Il serait bon d'ailleurs d'avoir la valeur exacte de d' dans ce cas (n° 264).

678. La transmission du son est beaucoup plus rapide dans les substances solides ou liquides que dans les gaz. On constate cette différence en se plaçant à l'extrémité d'une longue file de tuyaux de fonte (M. Biot), ou d'un mur de pierre (Hassenfratz. On entend distinctement les coups de marteau frappés à l'autre extrémité; et, si l'on fait attention, on percevra d'abord le son transmis par la matière solide, et ensuite le son transmis par l'air. Il résulte des calculs de Laplace que la vitesse de transmission étant 1 dans l'air, elle devient 4 1/2 dans l'eau pure; 4 7/10 dans l'eau de mer; 10 1/2 dans le laiton. MM. Sturm et Colladon ont trouvé dans le lac de Genève un résultat qui diffère peu de l'indication de Laplace. La vitesse du son dans un corps solide ou liquide est $\sqrt{\frac{g}{c}}$, g étant égal à $9^m,808$, c étant le raccourcissement que subit une colonne horizontale liquide ou solide d'un mètre de longueur, comprimée par un poids égal au sien.

En introduisant dans la formule le nombre 0=0000007738, que Borda a trouvé pour la contraction d'une règle en laiton comprimée par son propre poids, on obtient $3560^m,4$ pour la vitesse du son dans le métal. La vitesse du son déduite des vibrations longitudinales est $3596^m,6$ (*voyez* Vibr. longit.), ce qui surpasse d'environ un centième la vitesse précédente.

Tous les sons, quelle que soit leur nature, se propagent avec la même vitesse. Voilà pourquoi un concert, entendu à des distances très différentes, présente toujours la même harmonie.

Propagation du son.

679. Soit une lame vibrante $a\,b$, placée à l'ouverture d'un tuyau cylindrique d'une grande longueur (*fig.* 506). Supposons que cette lame soit écartée en $a''\,b''$, elle tendra à revenir à sa position d'équilibre $a\,b$. Dans cette position, elle aura acquis son maximum de vitesse; en vertu de cette vitesse acquise, elle s'éloignera jusqu'en $a'\,b'$, où elle aura perdu toute sa vitesse. Elle reviendra à la position $a\,b$, où elle aura de nouveau le maximum de vitesse, et perdra sa vitesse en $a''\,b''$, puis elle reviendra en $a'\,b'$, et ainsi successivement tant que durera le mouvement vibratoire : toutes les vibrations sont isochrônes, condition nécessaire pour que le son soit constant. Nous appellerons vibration le chemin de $a''\,b''$ à $a'\,b'$, plus le chemin de $a'\,b$ à $a'\,b''$. Si nous considérons comme positives les vitesses successives de $a''\,b''$ à $a'\,b'$, nous devrons considérer comme négatives celles de $a'\,b'$ à $a''\,b''$; en sorte que, si l'on divise le temps $A\,B$ d'une vibration complète en instans infiniment petits, et qu'on élève des perpendiculaires sur $A\,B$, proportionnelles aux vitesses qu'a la lame dans les différens instans, la courbe $A\,B\,C$, menée par les extrémités de ces perpendiculaires, représentera les vitesses successives de la lame.

Replaçons maintenant la lame vibrante en $a''\,b''$, la tranche d'air en contact avec $a''\,b''$ sera frappée, recevra une certaine vitesse; cette tranche frappera la tranche d'air voisine, et prendra l'état de repos, et ainsi successivement. Les choses se passent ici comme dans une suite de billes élastiques, égales et de la même matière. Dans l'instant suivant la lame $a''\,b''$ frappera la première tranche d'air avec une vitesse plus grande; cette tranche frappera les suivantes et ainsi de suite. Si l'on suppose que la lame continue à se mouvoir jusqu'en $a'\,b'$, l'état des vitesses positives imprimées aux tranches d'air sera représenté par la courbe $C\,B$. Dans le retour de la lame en $a''\,b''$, les tranches d'air auront des vitesses négatives correspondantes à celles de la lame. En sorte que la courbe $A\,C$ représentera les vitesses. Dans la partie $C\,B$ l'air est évidemment condensé, et dilaté dans la partie $A\,C$. La courbe $A\,C\,B$ représente tout à la fois les vitesses, les condensations et les dilatations des diverses tranches d'air. C'est là un résultat de calcul.

L'ensemble des points agités, pendant que le corps vibrant exécute une vibration, s'appelle

l'*onde sonore;* et *A B* est la *longueur* totale de l'onde : c'est l'espace parcouru par le son dans l'air pendant la durée de la vibration de la lame *élastique*. Nous négligeons la distance *a'' a'* parce qu'elle est toujours dans les sons appréciables très petites comparativement à *A B*. Ainsi, si la lame *a b* faisait dix vibrations par seconde, la longueur de l'ondulation serait le dixième de 340 mètres environ, qui est la vitesse du son; c'est-à-dire que la longueur d'ondulation serait de 34 mètres. Cette longueur est en général beaucoup moindre, parce que le nombre des vibrations des sons appréciables est presque toujours très supérieur à 10 par secondes. (*Voyez* le nº 673) (1).

Supposons maintenant que la lame continue à vibrer; il se formera de nouvelles ondulations. Le calcul prouve que l'état de la colonne d'air dans le tuyau cylindrique sera le même que si la courbe *A C B* glissait le long de ce cylindre. A chaque vibration de la lame élastique correspond une ondulation aérienne; en sorte qu'après *m* vibrations de la lame, il y a *m* ondulations aériennes d'égales longueurs, et composées chacune d'une partie raréfiée et d'une partie condensée.

Il est important de se familiariser avec ces considérations, parce qu'elles se représentent dans la théorie des ondulations lumineuses.

Le son dans un tuyau cylindrique ne doit pas éprouver d'affaiblissement, puisque la couche d'air ébranlée conserve la même étendue. C'est, en effet, ce qui est conforme à l'expérience. Ainsi une personne parlant à voix basse près de l'ouverture d'un tuyau cylindrique se fait entendre distinctement par une seconde personne, placée à une distance considérable, près de l'autre extrémité.

Si l'on conçoit une masse d'air indéfinie dans tous les sens, et l'ébranlement communiqué à un seul point, le son se propagera par des ondes sphériques, dont le centre sera au point ébranlé.

680. Le tuyau (*fig.* 505) était ouvert aux deux bouts. Supposons-le maintenant fermé à l'extrémité *D E* (*fig.* 485) et voyons comment se comporteront les ondes directes et les ondes réfléchies. Prenons le moment où le milieu de l'onde condensante atteint le fond *D E*. La partie réfléchie se trouve sur la partie directe, de manière que le commencement et la fin de l'onde sont en *A A'*. Ainsi les condensations de l'air sont exactement doublées dans toute la partie *A E*, en augmentant jusqu'au fond, où elles sont à leur maximum. En *A A'* la densité n'est pas changée, les mouvemens de translation étant en sens contraire et égaux dans l'onde directe et dans l'onde réfléchie, se détruisent dans toute l'étendue *A E*. La couche *A A'* ne subit aucun changement de densité. En effet si l'onde directe s'avance de manière à porter le point *l'* de l'onde raréfiante en *A*, le point *l* correspondant de l'onde condensante réfléchie sera aussi porté en *A*, la condensation devra exactement compenser la dilatation. Il en sera de même de toutes les couches A_1 A'' A_2 A''' A_3 A_{iv} distantes de *A A'* d'une longeur d'ondulation, ou d'un nombre quelconque d'ondulations. Les mêmes couches seront immobiles à l'instant de la coïncidence du commencement et de la fin d'une même ondulation, c'est-à-dire aux temps t, $2t$, $3t$, etc., t étant la durée de la propagation d'une ondulation. Dans les temps intermédiaires, elles auront des mouvemens alternativement contraires, comme on le voit aisément. Considérons maintenant une couche *d d'*, distante du fond d'une longueur d'ondulation λ, et de *A A'* seulement d'une demi-ondulation $\frac{\lambda}{2}$. Supposons que la fin de l'onde raréfiante directe *A. A* s'y rencontre avec le commencement de l'onde condensante *A E A* réfléchie, la couche *d d'* sera encore dans son état initial de densité, mais à dater de cette époque, elle n'éprouvera plus aucun déplacement, parce qu'elle subira toujours à la fois, l'action opposée de deux ondes de même nature. Il en est de même des couches *c c'*, *b b'*, *a a'*, distantes du fond de 2λ, 3λ, 4λ, etc.

Ces considérations pouvant être appliquées à une colonne aérienne quelconque *a a' D E*, *fig.* 486, vibrant dans un tuyau fermé par un bout, on voit que lorsque la superposition de deux systèmes d'ondes directs et réfléchis sera complète, cette colonne sera partagée en un certain nombre de parties vibrantes, dont les extrémités *D E*, *d d'*, *c c'*, etc., sont fixées, et dont les mouvemens sont alternativement contraires, comme l'indique la figure. Dans cette théorie, le fond du tuyau sera nécessairement un *nœud*, c'est-à-dire un point immobile, et l'orifice *un ventre*, c'est-à-dire un point où il ne se fait aucune variation de densité. Ces deux conditions pouvant être remplies d'une infinité de manières, le même tuyau doit produire une infinité de sons, ce qui, en effet, est confirmé par l'expérience, comme nous le verrons à l'article des instrumens à vent.

681. Soit maintenant un ébranlement instantané, déterminé dans un espace fini; chaque partie ébranlée ne produira dans les endroits voisins que ce qu'a produit le point unique considéré plus haut; mais à une certaine distance du centre d'ébranlement, tous les effets isolés se combineront de manière à produire, dans chaque tranche, une série d'ébranlemens tels que l'effet total sera égal à celui qui résulterait de la somme des ébranlemens partiels. Seulement il faut regarder comme positifs les mouvemens qui tendent à éloigner les particules du centre de l'ébranlement, et comme négatifs ceux qui tendent à les rapprocher. Cette co-existence des petits mouvemens est un principe extrêmement fécond : il permet de concevoir pourquoi les sons qui se produisent à la fois dans une salle se propagent

(1) Si λ est la longueur d'une onde condensante ou raréfiante, t le temps d'une oscillation du corps vibrant, v la vitesse du son dans l'air, on a $2\lambda = v\,t$.

séparément sans se confondre, et arrivent nets et distincts à l'organe de l'ouïe.

682. *Réflexion du son.* Le son est susceptible de se réfléchir à la manière de la lumière et de la chaleur, en faisant l'angle de réflexion égal à l'angle d'incidence. Quand une onde sonore rencontre un obstacle, elle est réfléchie, en suivant la loi énoncée, et peut, dans des circonstances convenables, produire ce qu'on appelle un écho.

Pour estimer le nombre des syllabes que peut répéter un écho, il faut connaître le nombre des syllabes qu'on peut prononcer dans une seconde de temps. Supposons-le de 10. Nous avons vu que la vitesse du son est de 340 mètres par 1″, ainsi un écho placé à $\frac{340}{2}$ mètres répétera 10 syllabes, de manière que la première arrivera à l'observateur, quand celui-ci prononcera la dernière. Si l'écho est placé plus loin, il répétera un plus grand nombre de syllabes : on en cite qui en répétaient jusqu'à 15. S'il est plus près il en répétera moins.

Dans les espaces clos, le son est ainsi renvoyé d'un mur à l'autre. Dans ce cas, les intervalles entre le son direct et le son réfléchi sont inappréciables. Mais si l'on se trouve à l'air libre, à une certaine distance de l'obstacle, il s'écoulera un temps sensible entre le son direct et le son réfléchi. S'il arrive qu'il y ait plusieurs obstacles, il se produira autant d'échos. On cite des échos qui répétaient le même son jusqu'à quarante fois.

Tout le monde a entendu parler des échos formés par des voûtes elliptiques; deux personnes placées aux foyers peuvent s'entendre, même en parlant à voix basse.

On a expliqué le roulement du tonnerre par la réflexion du son. On considère ce roulement comme étant le résultat du premier bruit réfléchi successivement par les diverses couches de l'atmosphère, dont les densités sont, comme on sait, différentes (1).

M. Poisson a déterminé par l'analyse ce qui se passe quand le son part de l'un des foyers d'un ellipsoïde ou d'un hyperboloïde de révolution, ou du foyer d'un paraboloïde de révolution. (*Voy.* le Mémoire de ce savant.)

C'est sur la réflexion du son qu'est fondé le porte-voix, le cornet acoustique, etc.

On démontre par la géométrie que le rayon sonore réfléchi dans le porte-voix, se rapproche de l'axe. Soit un rayon sonore parti de a (*fig.* 491 *bis*), le rayon réfléchi $b\,c$ fait avec l'axe $a\,c$ un angle $b\,c\,a$ plus petit que l'angle $b\,a\,c$ que fait le rayon direct $a\,b$ avec le même axe. En effet soit menée $g\,l$ parallèle à l'axe $c\,d$, on a l'équation $h\,b\,c = a\,b\,d = h\,b\,g + g\,b\,c = l\,b\,a - d\,b\,l$; mais $g\,b\,h = l\,b\,d = b\,d\,a$ et $g\,b\,c = b\,c\,a$; en remplaçant, dans la première équation, $h\,b\,g$ et $g\,b\,c$ par leurs valeurs, on a $b\,a\,c - b\,c\,d = 2\,l\,b\,d = 2\,b\,d\,a$. Le rayon $c\,k\,m$ fournirait le même résultat.

(1) Dans les expériences que fit la commission de l'Académie en 1822, les coups de canon tirés à Montlhéry étaient accompagnés d'un roulement qui durait jusqu'à 25″. Mais on a remarqué qu'il n'eut jamais lieu qu'au moment de l'apparition de quelques nuages, et que par un ciel serein le bruit était unique. (*Ann. de Chim. et de Phys.*, t. 20, p. 222.)

Vibrations des corps solides ou liquides.

683. Tous les corps peuvent vibrer. Nous examinerons d'abord les vibrations transversales des cordes, parce qu'elles nous serviront à faire comprendre l'échelle musicale.

Une corde rendue rectiligne par une tension, et écartée de sa position par une cause quelconque, y revient par une suite d'oscillations. Voici la relation que le calcul donne pour une corde tendue par un poids, $t = \sqrt{\frac{lp}{gP}}$; t est le temps d'une oscillation très petite, g la gravité, l la longueur et p le poids de la corde, et P le poids attaché à une des extrémités de la corde, et qui la maintient dans un état de tension; si à la place de p on met sa valeur $l\,\pi\,r^2\,d\,g$ (d étant la densité), on aura $t = r\sqrt{\frac{\pi d}{P}}$; ou si n est le nombre des vibrations faites pendant l'unité de temps, on aura,

$$n = \frac{1}{r\,l}\sqrt{\frac{P}{\pi^2\,d}}.$$

De cette formule résultent plusieurs conséquences remarquables.

1° Les nombres de vibrations de deux cordes de même matière, de même diamètre, et également tendues, sont *en raison inverse de leurs longueurs*.

2° Si la matière, le diamètre et la longueur sont les mêmes, et que la tension soit différente, les nombres d'oscillations sont proportionnels *aux racines carrées* de poids qui tendent les cordes.

3° Les nombres de vibrations des cordes de même nature sont en *raison inverse de leurs diamètres*.

4° Les nombres de vibrations des cordes de matières différentes, sont en *raison inverse des racines carrées de leurs densités*.

On vérifie la loi relative aux poids de la manière suivante : si cette loi est fondée, une corde tendue par un poids représenté par 4 doit donner le même son que la même corde réduite à moitié, et tendue par un poids représenté par 1; ce qui est en effet conforme à l'expérience.

Cela posé, il est facile de représenter les sons par des nombres; à cet effet, on emploie un instrument connu sous le nom de *monocorde* (*fig.* 484),

qui consiste en une caisse en bois, portant deux cordes, l'une en métal, l'autre à boyau, ou toutes deux en métal. Chaque corde est fixée par une extrémité, et tendue à l'autre extrémité par des poids (1).

La caisse, comme nous le verrons, sert à renforcer les sons.

Veut-on donner à la même corde diverses longueurs, on emploie un petit chevalet mobile de forme triangulaire. Le chevalet désigné par *F* a une hauteur telle qu'étant placé entre la caisse du monocorde et la corde elle-même, celle-ci presse dessus, et se trouve ainsi fixée en ce point.

Si le chevalet est placé au milieu de la corde, le nombre de vibrations faites par chaque moitié sera double, dans un temps donné, de celui que fait la corde entière, et le son rendu par chaque moitié sera ce qu'on appelle l'*octave* aiguë du son de la corde entière.

Si l'on place le chevalet au tiers de la corde, le son rendu par cette portion sera plus aigu encore que le précédent, et sera l'octave du son que fait entendre l'autre portion qui est les 2/3 de la corde entière. Ce dernier est ce qu'on appelle en musique la *quinte* du son produit par la corde entière; en continuant de la même manière, on formerait la série suivante :

Sons.	*ut*,	*ré*,	*mi*,	*fa*,	*sol*,	*la*,	*si*,	*ut*.
Nombre des vibrations.	1,	9/8,	5/4,	4/3,	3/2,	5/3,	15/8,	2.
Longueur des cordes.	1,	8/9,	4/5,	3/4,	2/3,	3/5,	8/15,	1/2.

Les musiciens donnent des noms particuliers aux rapports des nombres de vibrations par lesquels sont représentés les différens sons. Voici ces dénominations :

Intervalles.	Rapport des vibrations.	Dénominations.
Ré à *ut*	9/8	ton majeur,
mi à *ré*	10/9	ton mineur,
fa à *mi*	16/15	semi-ton majeur,
sol à *fa*	9/8	ton majeur,
la à *sol*	10/9	ton mineur,
si à *la*	9/8	ton majeur,
ut à *si*	16/15	semi-ton majeur.

La différence entre un ton majeur et un ton mineur est tolérable. Le nombre 80/81 par lequel il faut multiplier un ton majeur pour avoir un ton mineur, s'appelle un *comma*.

684. Si l'on commençait la gamme par une autre note que par un *ut*, les intervalles ne seraient plus ceux qui sont indiqués dans ce tableau, c'est-à-dire deux tons entiers, un demi-ton, trois tons entiers et un demi-ton. C'est pour obtenir les tons dans la même gradation, qu'on a introduit des sons intermédiaires. Ces sons portent le nom de la note inférieure, suivi du mot *dièse*, ou celui de la note supérieure, suivi du mot *bémol*. Le nombre des vibrations d'une note diésée est augmenté dans le rapport de 24 à 25 : une note bémolisée est abaissée dans le rapport de 25 à 24. Ainsi, pour diéser ou bémoliser, il faut multiplier le nombre des vibrations par 25/24 ou par 24/25.

Les sons que représentent ces deux notes sont confondus dans les instrumens à sons fixes, le piano, l'orgue, etc., mais distincts dans le violon, la flûte, etc.

Le signe *dièse* ou le signe *bémol* indique une note diésée ou bémolisée.

L'introduction de ces notes auxiliaires permet de de commencer la gamme par une note quelconque.

Soit par exemple.

8/9	10/9	9/8	16/15	8/9	10/9	16/15	
fa	*sol*	*la*	*si*	*ut*	*ré*	*mi*	*fa*
.	.	.	.	$_2$	$_2$	$_2$	$_1$

Si l'on compare les intervalles de ces huit notes, on voit qu'ils sont ceux de la gamme, à l'exception de celui de *la* à *si* et de *si* à *ut*. Si l'on abaisse le *si* d'un demi-ton en le multipliant par 24/25, c'est-à-dire en le changeant en *si bémol*, l'intervalle de *la* à *si* deviendra 9/8 × 24/25 ou 16/15 × 81/80, ce qui est sensiblement égal à 16/15; l'intervalle de *si* à *ut* deviendra 16/15 × 25/24 ou 10/9 qu'on peut confondre avec 9/8. Ainsi la série sera *fa sol la si bémol ut ré mi fa* dans laquelle la succession des intervalles est la même que dans la gamme commençant par *ut*.

On donne le nom de *tons* aux diverses gammes qu'on peut former de cette manière.

La première note de chaque ton porte le nom de *note fondamentale* ou *tonique*.

On conçoit qu'un chant gagne à être écrit dans un ton plutôt que dans un autre. Le musicien peut, pour jeter de la variété dans le chant, passer, dans le même morceau, d'un ton à un autre ton, c'est ce qu'on appelle *moduler*.

Il y a des gammes où la première tierce est majeure, comme *ut*, *mi*; *sol*, *si*; *fa*, *la*; dont le rapport est 5/4 ainsi que le montre l'inspection des intervalles de la gamme naturelle. Il y a des gammes où la première tierce est mineure, comme *la*, *ut*, l'intervalle *la ut* est 6/5; c'est ce qui a fait la distinction des tons en mode majeur ou mineur, selon que la tierce de la tonique est majeure ou mineure.

En multipliant la série des nombres qui représentent les vibrations successivement par 2, 2²,

(1) M. Savart a proposé et employé un monocorde vertical, ce qui est plus exact.

2^5, on aura la 1re, la 2e, la 3e octave au-dessus; pour avoir la 1re octave, la 2e octave, etc., au-dessous, on multiplierait les mêmes nombres successivement par $1/2, \frac{1}{2^2}$... Réciproquement connaissant le nombre qui représente un son, on peut en trouver le nom et l'octave. Par exemple 20 : on le divisera par 2^4, on aura $20/2^4 = 5/4 = mi$. Conséquemment 20 correspond à $mi \times 2^4$ ou à la cinquième octave.

On appelle *seconde* l'intervalle de *ut* à *ré*, *tierce* celui de *ut* à *mi*, *quarte* celui de *ut* à *fa*, *quinte* celui de *ut* à *sol*, etc. Deux sons qui sont à l'octave, ou à la tierce, ou à la quinte l'un de l'autre, forment un *accord* ou une *consonnance*. La seconde ou la septième forme une *dissonnance*.

L'accord le plus agréable à l'oreille est l'octave.

On donne le nom d'accord parfait à l'ensemble de trois sons, comme *ut*, *mi*, *sol*; tels que le premier et le second, forment une tierce majeure, le second et le troisième une tierce mineure, et le premier et le troisième une quinte.

Comment a-t-on été conduit à l'invention de la gamme, déjà connue aux beaux siècles de la Grèce? On n'en sait rien; cependant il est remarquable que les divers sons de cette série peuvent se réduire en trois accords parfaits formés de tierces et de quintes; *ut*, *mi*, *sol*; *fa*, *la*, *ut*; *sol*, *si*, *ré*, entièrement semblables. Seulement dans la seconde série nous supposons le *fa* et le *la* transporté à la gamme au-dessous, et le *ré* de la troisième série transporté à la gamme au-dessus, ce qui est permis à cause de la grande ressemblance d'un son avec son octave. En sorte qu'on a cette série *fa*, *la*, *ut*, *mi*, *sol*, *si*, *ré*, composée de tierces et de quintes, qui est en quelque sorte la série des sons harmoniques produits par une seule corde.

685. *Sons harmoniques*. Si l'on fait vibrer une seule corde, elle produit en même temps plusieurs sons; on en entend en général trois; mais une oreille attentive et exercée peut en distinguer cinq, même sept. Supposons que le son fondamental soit représenté par l'unité, les deux sons concomitans seront représentés, l'un par 3, et l'autre par 5, de sorte que le premier étant *ut*, le second sera l'octave de la quinte ou *sol*, et le troisième la double octave de la tierce majeure ou $\overset{2}{mi}$. Avec de l'attention et de l'habitude on distingue deux autres sons. Le premier est représenté par 2 et le second par 4. Ils sont donc l'octave et la double octave du son principal, c'est-à-dire $\overset{2}{ut}$ et $\overset{3}{ut}$.

Il résulte de là qu'une corde rend à la fois les sons représentés par les nombres 1, 2, 3, 4 et 5.

Il paraîtrait que ce ne sont là que les premiers termes d'une série infinie; car si l'on dispose à côté de la corde mise en vibration, plusieurs autres cordes de même diamètre et d'égale tension, mais dont les longueurs soient 1/2, 1/3, 1/4, 1/5, 1/6, etc., de la première, elles vibrent toutes en même temps.

On a donné le nom de générateur au son principal, et les sons qui l'accompagnent ont été appelés sons *harmoniques*.

Parmi les différentes explications proposées pour les sons harmoniques, la suivante de Daniel Bernouilli a le plus fixé l'attention. Elle consiste à supposer qu'en même temps que la corde entière vibre autour de sa position d'équilibre, chacune de ses parties vibre aussi, sans que les vibrations partielles se nuisent mutuellement. Une expérience de Sauveur semble venir à l'appui de cette explication.

Si l'on place un chevalet en un point d'une corde, tel que les parties résultantes aient un rapport simple avec la corde entière, et que le chevalet n'appuie pas assez fortement pour intercepter toute communication entre les deux parties de la corde; si l'on fait vibrer chaque partie séparément, elles rendront le même son, qui sera différent de celui de la corde entière; le son qu'elles feront entendre aura l'unité pour expression. Ainsi, si le chevalet est placé au quart de la corde, la plus grande en sera les 3/4; cette partie pour rendre le même son que la plus petite, se divisera en trois portions égales chacune à la plus petite. En effet, si l'on dispose d'avance à chaque tiers de la grande partie un morceau de papier, il restera en repos malgré la vibration de la corde, ce qui prouve l'existence des *nœuds* en ces points. Si, au contraire, on place le papier dans un point différent, il sera renversé dès le premier moment de la vibration. On entend encore facilement les sons harmoniques d'une cloche en vibration.

686. *Tempérament*. Supposons un instrument à sons fixes, tel qu'un piano ou une harpe, qui rende exactement tous les sons de la gamme ainsi que les bémols et les dièses, et toutes les octaves de chaque note. La harpe perfectionnée d'Erard remplit ces conditions. Néanmoins on ne pourra pas y trouver toutes les quintes et toutes les tierces justes.

On peut s'en assurer de la manière suivante :

Prenons pour point de départ l'ut_1, et représentons-le par 1. Le sol_1 sera $\frac{3}{2}$ dont la quinte $ré_2$ sera $\frac{3}{2} \times \frac{3}{2}$; dont la quinte sera la_2 ou $\frac{2}{3} \times \frac{3}{2} \times \frac{3}{2}$ etc. La 12e quinte sera $\left(\frac{3}{2}\right)^{12}$, laquelle devrait se trouver sur $ut_8 = 2^7$, ou du

moins n'en diffère que d'un comma $\frac{80}{81}$, tandis qu'elle tombe sur *si* $\frac{\text{dièse}}{7}$.

Un calcul analogue appliqué aux tierces aurait conduit à un résultat semblable.

Pour obvier à cet inconvénient, les musiciens emploient différentes méthodes, qu'ils désignent sous le nom de tempéramens.

Dans toutes ces méthodes on est convenu de conserver la justesse des octaves, parce que l'oreille n'y souffre pas la moindre altération. Dans la plus simple et la plus exacte, on a adopté le tempérament égal, qui consiste à altérer toutes les quintes également. Représentons par x le nombre qu'il faudrait substituer à $\frac{3}{2}$ pour que $x^{12} = 2^7$, on en tirera $x = 1,4983$, nombre bien peu différent de $\frac{3}{2}$ ou 1, 5.

Si l'on veut qu'un monocorde rende ces diverses quintes ainsi tempérées, il faudra le diviser en raison inverse des puissances de 1,4983.

Cette division faite avec toute l'exactitude des expériences de physique, on accordera à l'unisson des diverses quintes ainsi obtenues, les cordes de l'instrument qu'on veut établir. Le reste n'offrira plus de difficulté; car le premier *ut* fournira tous les autres *ut* par accord d'octave, de même le *ré*$_1$ donnera tous les *ré*, ainsi de suite. Cette opération donnera les dièses. Seulement on remarquera que dans les instrumens à sons fixes, il n'y a pas de note entre *mi* et *fa*, entre *si* et *ut*, parce que ces notes ne diffèrent que d'un demi-ton, et que dans les instrumens à sons fixes les dièses et les bémols se confondent.

Voici les douze demi-tons égaux d'une gamme ainsi tempérée. Chaque demi-ton devant, par sa multiplication 12 fois par lui-même, produire 2, l'octave du son fondamental est la racine 12e de 2 ou 1,059463.

	Nombre des vibrations.	Longueur des cordes.
Ut	1,000000	1,000000
ut dièse ou *ré bémol*	1,059463	0,943874
ré	1;122462	0,890899
re dièse ou *mi bémol*	1,189207	0,840896
mi	1,125992	0,793701
fa	1,334840	0,749151
fa dièse ou *sol bémol*	1,414213	0,707107
sol	1,498306	0,667420
sol dièse ou *la bémol*	1,587400	0,629902
la	1,68179	0,594604
la dièse ou *si bémol*	1,781796	0,561230
si	1,887745	0,529730
ut	2,000000	0,500000

La tierce et la quinte moyenne de cette gamme tempérée sont l'une un peu plus forte, l'autre un peu plus faible que la tierce et la quinte rigoureuses.

Les musiciens adoptent aussi un autre mode de tempérament, lequel consiste à faire porter les erreurs sur des intervalles rarement employés.

Le violon, la basse, la voix humaine, ne tempèrent pas quand ils exécutent seuls, parce qu'ils peuvent rendre tous les sons, tels qu'ils doivent être relativement à la nouvelle tonique; mais ils sont obligés de tempérer quand ils accompagnent un instrument à sons fixes, sans quoi il en résulterait une discordance désagréable.

687. *Vibrations longitudinales des cordes.* Une corde tendue par ses extrémités peut vibrer dans le sens de la longueur. Il suffit pour y exciter des vibrations de la frotter avec les doigts enduits de colophane ou même avec un archet.

Le mode plus simple de ces vibrations, celui qui répond au son le plus grave, est représenté dans la *fig.* 482 *ter*. La corde entière a un mouvement alternatif vers l'une et l'autre extrémité. Tandis qu'il y a condensation en *A*, il y a dilatation en *B*, et réciproquement. Les points *A* et *B* restent nécessairement immobiles, quoique variant de densité; le point *C* au contraire conserve la même densité et éprouve le plus grand déplacement.

Dans le second mode qui est représenté *fig.* 482 *quater*, la corde est divisée en deux parties égales, lesquelles sont séparées par un nœud de vibration immobile *C*, et vibrent en sens opposés. Après ce second mode vient celui où il y a deux nœuds de vibration, etc. Ces vibrations ont, comme on le verra plus loin, une analogie complète avec les vibrations des colonnes aériennes. (*Voyez* Instrum. à vent.)

Pour obtenir une division en parties aliquotes, il faut déterminer un nœud de vibration en touchant la corde.

Les sons produits par les vibrations longitudinales des cordes sont dans le même rapport que ceux que produisent les vibrations transversales, c'est-à-dire en raison inverse des longueurs; seulement ils sont plus aigus. L'analyse démontre qu'on a $s' \sqrt{l} = n \sqrt{a}$; s' le nombre des vibrations transversales dans un temps donné; n le nombre des vibrations longitudinales, l la longueur de la corde et a l'allongement de cette corde sous la tension qu'elle supporte.

688. *Vibrations des verges solides, droites.* Les vibrations d'une verge solide, droite, par exemple d'une verge d'acier, peuvent avoir lieu, comme celles des cordes, transversalement et longitudinalement; mais les lois de leurs vibrations transversales sont différentes de celles auxquelles les cordes sont soumises.

La rigidité seule d'une verge solide suffit pour la tenir tendue. Il n'est donc pas nécessaire qu'elle soit fixée à ses deux extrémités, comme une corde, pour être mise en vibration.

Il faut considérer six cas différens. Un bout fixé ou appuyé et un bout libre, deux bouts libres ou appuyés ou fixés, un bout fixé et un bout appuyé.

Soit une verge solide, fixée par un bout, par exemple serrée dans un étau, on la met en vibration à l'aide d'un archet. Pour produire des nœuds analogues à ceux que présentent les cordes, on touche, avec le doigt ou avec un corps solide, les points qu'on veut réduire à l'immobilité. En couvrant les verges planes de sable fin, on rend sensibles à l'œil les subdivisions spontanées qu'elles éprouvent dans leurs vibrations. Tous les grains, agités par le mouvement vibratoire, se rassemblent dans les nœuds; on observe les mêmes effets sur les verges cylindriques, en y enfilant de petits anneaux de papier.

Nous citerons quelques exemples.

Un bout fixé, l'autre libre.

Le cas le plus simple est celui où la verge vibre dans toute son étendue (*fig.* 507). Le son produit est le plus grave que puisse produire la verge. Les autres modes de vibrations, les plus simples après celui-ci, sont représentés par la *fig.* 507 *bis*. Pour déterminer les modes de division, différens du premier cas, il faut toucher la verge en un point où l'on veut un nœud; mais il est nécessaire de remarquer que le son ne sort net et distinct qu'autant que ce point correspondra à un mode de division possible. Le violon en fer est construit avec des verges différentes en longueur fixées par un bout sur une caisse en bois, ayant la forme d'un demi-cylindre.

Voici les résultats tirés du calcul :

1° *Pour des verges de même matière, mais différentes par leur épaisseur et leur longueur, le nombre des vibrations est proportionnel aux épaisseurs des lames et réciproque aux carrés de leurs longueurs.* Il résulte de là que, pour des lames de même longueur, celles qui ont le plus d'épaisseur rendent les sons plus aigus.

2° *Pour des verges de même matière et de figures semblables, et dont les épaisseurs sont dans le même rapport que les longueurs, les nombres des vibrations sont en raison inverse des racines cubiques des poids des lames.*

3° *La largeur n'a aucune influence sur les sons rendus par les lames mises en vibration transversalement.*

689. *Vibrations longitudinales.* Les verges droites peuvent vibrer aussi dans le sens de leur longueur. Le moyen qui réussit le mieux consiste à les serrer en les enveloppant d'un morceau de drap mouillé, et à les frotter ainsi dans le sens de leur longueur. Il faut qu'on les soutienne par un autre point; ce point devient un nœud de vibration. Les subdivisions des verges en parties aliquotes s'obtiennent de même que dans les expériences sur les vibrations transversales. Les nombres des vibrations longitudinales sont réciproquement proportionnels aux longueurs des verges, et l'acuité des sons, pour des longueurs égales, est excessivement plus grande que celle des sons rendus par des vibrations transversales; c'est pourquoi il faut employer des verges très longues pour pouvoir apprécier les sons (1).

La série des sons successifs est la même pour les cordes et pour les verges rigides, lorsque les unes et les autres exécutent des vibrations longitudinales.

Le son le plus grave est produit par le mode de vibration le plus simple, la tige étant fixée par un bout; c'est le premier cas des vibrations longitudinales des cordes. Si l'on suspend la verge fixée par son milieu, le son produit est à l'octave aigu du premier. On verra que c'est absolument la même chose que dans la vibration des colonnes aériennes; en effet le son le plus grave produit par un tuyau ouvert par les deux bouts, s'obtient quand il se forme un nœud au milieu; il est à l'octave aigu du son le plus grave d'un tuyau d'une égale longueur ouvert par un bout.

Cette analogie entre les vibrations des verges rigides et celles des colonnes aériennes, a fourni un moyen pour déterminer la vitesse du son dans les corps solides; pour cela il faut qu'on fasse résonner un tuyau et une verge rigide de même longueur, si nous supposons que le tuyau soit ouvert par les deux bouts et la verge rigide libre par les deux extrémités; l'onde qui produit le son dans le tuyau a pour longueur la longueur du tuyau. Le nombre des vibrations dans un temps donné sera donc en raison directe de la vitesse v de la propagation dans l'air, et en raison inverse de la longueur l du tuyau. On aura $s = \frac{v}{l}$, s représentant le son. On aura de même pour la verge rigide $s' = \frac{v'}{l}$, d'où $\frac{s}{s'} = \frac{v}{v'}$. Chladni (p. 101) a ainsi déterminé la vitesse du son dans un grand nombre de corps solides. La colonne d'air qu'il faisait vibrer avait deux pieds de longueur et rendait *ut*. Une verge d'acier de la même longueur rendait $\frac{3}{7}$ *ut*. D'où il a déduit que la vitesse dans l'acier est

(1) M. Poisson a déterminé par l'analyse le rapport entre le nombre des vibrations transversales et le nombre des vibrations longitudinales. Le rapport dépend de la forme des verges. Une verge parallélépédique, libre par les deux bouts et rendant le son le plus grave, est assujettie à la relation suivante $n' = (2{,}0561)\frac{n\,e}{l}$, et une verge cylindrique à $n' = (1{,}7806)\frac{n\,e}{l}$.

Des expériences de M. Savart sont d'accord avec ces formules.

On représente par n' le nombre des vibrations transversales; n celui des vibrations longitudinales; par l la longueur, et par e l'épaisseur de la verge.

$16\frac{2}{3}$ fois plus grande que dans l'air (1). Ce moyen n'est pas très exact, puisqu'il conduit à la même vitesse dans le verre et l'acier que dans le sapin; mais il suffit pour démontrer que la transmission du son se fait beaucoup plus vite dans les corps solides ou liquides que dans les gaz.

690. M. Savart a remarqué que les lignes nodales ne sont nullement correspondantes sur les deux surfaces d'une même lame. Ainsi, qu'on tienne entre les doigts une lame par son milieu, et qu'on la frappe à l'un quelconque de ses bouts, si l'on a répandu d'avance du sable sur la surface, la formation de nœuds sera rendue sensible par la disposition du sable. Maintenant, si l'on retourne la lame de manière que la face inférieure devienne supérieure et réciproquement, et qu'on recommence l'expérience de la même manière, la distribution des lignes nodales sera tout autre qu'elle n'était sur la première surface : celles d'une surface correspondront aux milieux des parties vibrantes de l'autre. On obtiendra ce résultat avec des lames de 2 à 4 millimètres, formées avec une substance solide quelconque. Les subdivisions varient selon le point touché pour soutenir la lame entre les doigts.

Dans chaque cas on n'entend qu'un son appréciable, correspondant à la division principale établie par le point de contact; mais la multiplicité des lignes nodales indique qu'il s'en produit en même temps d'autres; les sons secondaires sont analogues aux sons harmoniques. Le même physicien, en soumettant à ses expériences des lames assez épaisses et assez larges pour qu'il pût étudier la configuration des lignes nodales sur toutes leurs faces, a reconnu que ces lignes forment des spires continues, et que, pour un même son, *le sens de ces spires et l'intervalle qui les sépare sont constans*. Dans ces expériences, M. Savart attache à la lame une tige mince de verre, dont la friction sert d'excitateur.

(1) Il est à remarquer que la vitesse ainsi obtenue n'est pas la même que celle qu'on obtiendrait pour une masse indéfinie dans tous les sens. M. Poisson a trouvé que le rapport entre la première et la seconde vitesse est $\frac{\sqrt{6}}{\sqrt{5}}$.

Soit v la vitesse dans une barre très peu épaisse et d'une longueur indéfinie.

Soit n le nombre des vibrations dans l'unité de temps pour une verge d'une longueur l, et libre par les deux extrémités, on a $v = \frac{n}{l}$. Si l'on considère les trois dimensions du corps on a $v = \frac{l}{n}\frac{\sqrt{6}}{\sqrt{5}}$.

691. Il résulte aussi des observations de Chladni, que les verges droites sont susceptibles d'un autre mode de vibrations, qu'il a appelées *tournantes*. On détermine ces vibrations en imprimant à des tiges rigides une torsion plus au moins forte. (*Voy.* l'Acoustique de Chladni, p. 110.)

692. *Verges courbes*. On conçoit que la forme des verges doit avoir une influence sur la nature des mouvemens dont elles sont susceptibles, et par suite sur les sons qu'elles font entendre.

Le diapason est formé par deux branches courbes, un peu plus écartées à la base qu'à leurs extrémités (*fig.* 512 *bis*). A l'aide d'un cylindre qu'on introduit dans la partie la plus large $A\ B$, et qu'on force ensuite à passer entre les extrémités les plus rapprochées $C\ D$, on met en vibration les deux tiges $A\ B$ et $C\ D$; elles produisent toujours le même son quand elles sont ébranlées de la même manière. Ce son sert de type invariable pour régler le ton d'un instrument quelconque. Un diapason ainsi construit ne fournit qu'une seule note; mais on peut en avoir douze graduées de manière à donner les douze demi-tons dont se compose une octave entière dans le système à tempérament égal.

Avec ce diapason complet on accorde d'abord à l'unisson chaque note correspondante sur l'instrument à sons fixes, puis on achève de régler tous les autres sons par accord d'octave.

Il suffit même d'avoir une seule note, le *la* par exemple, on obtient les autres notes par accord de quinte; c'est ainsi qu'on opère pour le violon et les instrumens analogues. Le *la* du diapason correspond à la_2, on considérant comme *ut*, l'*ut* du violoncelle.

693. *Des surfaces vibrantes*. Les vibrations excitées dans les lames élastiques, à l'aide d'un archet qu'on passe avec frottement sur leurs bords, produisent des effets très curieux et très variés.

Dans les surfaces vibrantes, les limites entre les ondulations sont marquées par les lignes de repos qu'on a nommées *lignes nodales*.

Du sable fin ou de la poudre de lycopode qu'on répand uniformément sur la lame vibrante, va se rassembler dans les endroits en repos, et produit ainsi des figures plus au moins composées, mais qui souvent présentent une symétrie parfaite. En général, quand un système rigide, de forme quelconque, exécute des vibrations, soit longitudinales, soit transversales, ce système se partage en un certain nombre de parties qui exécutent leurs vibrations séparément.

Les mouvemens simultanés des concamérations voisines sont nécessairement de signe contraire.

Nous ne rapporterons ici que les cas les plus simples. Il faut donner aux plaques un point d'appui qui leur permette de résister. Pour cela on les serre par le moyen d'une pince à vis, et on les frotte sur leurs bords avec un archet. Il est clair

que ces bords sont préalablement adoucis et usés à l'émeri.

La *fig.* 483 est celle qui donne le son le plus grave dans les plaques carrées de métal, de verre ou d'une substance homogène; pour l'obtenir, on applique l'archet à l'un des angles.

Si, tenant toujours la lame par le centre, on applique l'archet au milieu d'un des côtés, on obtient la *fig.* 483. Alors les lignes nodales passent par les diagonales; le son produit est le plus grave après le précédent; il en est la quinte aiguë. En variant les formes des plaques et les points d'application de l'archet, on donne naissance à une multitude de figures dont quelques-unes sont représentées *fig.* 502. (Chladni.)

Tous les modes des divisions qu'offrent chaque corps peuvent se transformer les unes dans les autres, en sorte qu'il peut toujours rendre un son quelconque. Un même son correspond à plusieurs modes de division. (M. Savart.)

Dans les plaques dont l'élasticité n'est pas la même dans tous les sens, le mode de vibrations est changé. Par exemple, dans des plaques de bois dont le plan est parallèle à la direction des fibres, les vibrations présentent des particularités qui tiennent à ce que la réaction élastique des lames est plus grande dans le sens de leurs fibres que dans tout autre sens.

M. Savart a fait sur ce sujet un grand travail, dans lequel il a reconnu que les cristaux ne présentent pas la même élasticité dans tous les sens. (Voy. *Ann. de Ch. et de Ph.*, t. 40.)

M. Savart a découvert un phénomène fort curieux, c'est l'oscillation des lignes nodales.

Prenons un plateau métallique circulaire de 18 pouces de diamètre, supposons-le fixé par son centre et l'archet appliqué à un point de la circonférence : tant que l'archet reste au même point, les lignes diamétrales sont immobiles; mais si on le détache brusquement, elles oscillent autour de la position qu'elles occupaient d'abord, et elles ne reviennent que quand le mouvement est sur le point de cesser.

Si pendant l'oscillatiou de ces lignes nodales, on reporte des coups d'archet au même point de la circonférence et à des intervalles de temps égaux, on parviendra même à obtenir des lignes nodales circulaires animées d'un mouvement de rotation. Pour ces sortes d'expériences la poudre de lycopode doit être substituée au sable.

La permanence du même nombre des vibrations dans un temps donné, étant une condition essentielle à ce mouvement, on ne pourra l'exciter que dans des plaques circulaires, dans des anneaux, et dans des cloches.

L'oreille est avertie des oscillations par des variations alternatives dans l'intensité du son. Ces variations n'existent pas quand le mouvement de rotation s'établit. (*Anch. phys.*, t. 36.)

Il résulte encore des recherches de M. Savart, qu'on peut aussi tirer des sons des membranes tendues; pour cela, il suffit de faire vibrer près de la membrane tendue une plaque solide qui ne la touche par aucun point, les vibrations de la plaque solide se communiquent par le moyen de l'air à la membrane. Cette communication de mouvement est au reste analogue à ce que nous avons rapporté relativement aux vibrations excitées dans plusieurs cordes par le moyen d'une seule corde en vibration.

On a aussi étudié les vibrations des corps de forme plus composée, et en particulier des vases dont les surfaces extérieures et intérieures sont des révolutions autour d'un même axe. C'est ce dernier genre de vase qui est employé dans les cloches et dans l'harmonica. L'instrument appelé *harmonica* est formé d'un certain nombre de vases de verre inégaux en grandeur, mais semblables par leur forme. On met ces vases en vibration, soit à l'aide d'un archet, soit en les frottant avec le doigt mouillé.

694. *Vibrations des corps dans différens milieux.* L'influence de la masse fluide dans laquelle vibre un corps solide se fait surtout sentir sur les faces qui sont le siége de vibrations normales ou obliques, mais elle agit peu sur celles dans lesquelles on a déterminé des vibrations tangentielles (M. Savart). Nous citerons deux exemples : un disque de verre ébranlé par un petit tube de verre fixé à son centre, et perpendiculairement à sa surface, rend dans l'eau un son beaucoup plus grave que dans l'air.

Une verge ou une lame qui vibre longitudinalement donne sensiblement le même son dans l'air que dans l'eau ou le mercure.

Instrumens à vent.

695. Les instrumens à vent sont généralement composés de tuyaux dont la forme est variable, et dans lesquels l'air est mis en vibration, suivant le sens de leur longueur, par divers moyens.

Il n'y aura point de son si l'on souffle simplement dans un tube, car on ne produit ainsi qu'un mouvement dans la colonne d'air qu'il renferme; il faut y exciter, en un de ses points, une succession rapide de condensations et de dilatations alternatives : ces mouvemens alternatifs, transmis à la colonne d'air, y déterminent des ondes sonores, C'est ainsi qu'on fait entendre un son aigu en soufflant dans une clef forée.

Le sifflet est propre à donner une idée de la forme des tuyaux sonores. Il est composé d'un *pied a b* (*fig.* 498) qui apporte le vent; d'une *bouche c d* qui fait parler, et d'un *tuyau e f* qui contient la colonne d'air qui doit vibrer et produire le son.

Les tuyaux d'orgues, appelés tuyaux à bouche ou à flûte, sont disposés de la même manière; ces tuyaux sont représentés dans la *fig.* 494. A une certaine distance de l'extrémité *D D*, est une ouverture latérale *B* qu'on appelle la *bouche*, parce que c'est elle qui fait parler le tuyau. La partie *B C*

qui est au-dessus de cette ouverture, est appelée la *lèvre supérieure;* elle est aplatie et rentrée en dedans. C'est contre cette partie de la paroi que vient se briser la lame d'air qui met la colonne en vibration. A cet effet on joint au tuyau un cône *e f g* qu'on appelle le *pied*, parce qu'il sert de pied au tuyau quand il est en place. C'est par une ouverture pratiquée à la pointe du cône qu'entre le vent des soufflets; il est fermé à sa base par une lame métallique *e k k*, dans laquelle on pratique une ouverture *k k'*, que l'on nomme la *lumière*. La partie *A B* de la paroi du tuyau conique qui est au-dessous de la lumière, et qu'on nomme la *lèvre inférieure* du tuyau, est aplatie comme la lèvre supérieure, et elle rentre comme elle en dedans, en formant avec l'axe commun des tuyaux un angle de 22 degrés et demi. Ce système étant ainsi disposé, on souffle de l'air par le sommet du cône; ce fluide s'échappe par la lumière *k k'*, en formant une lame mince qui se brise contre la lèvre supérieure *B C*. Si la direction de cette lèvre est convenable, l'air du tuyau se met en vibration; mais si elle est trop ou trop peu rentrée en dedans, le tuyau parle mal, ou même ne parle pas : on modifie la lèvre peu à peu, jusqu'à ce que le tuyau rende des sons nets et distincts.

L'ouverture de la bouche doit avoir une certaine grandeur, qu'on trouve par tâtonnement. Si elle est trop grande, le tuyau pourra bien ne pas parler; si elle est trop étroite, il octaviera, c'est-à-dire qu'il fera entendre un son plus élevé que le son fondamental qui convient à sa longueur.

La grandeur de la bouche, celle de la lumière, et la longueur des lèvres sont aussi assujetties à des proportions que l'expérience fait connaître. Il faut également observer un certain rapport entre la longueur et la grosseur des tuyaux. La force avec laquelle la lame d'air frappe la colonne de ce fluide contenue dans le tuyau, doit être proportionnée à la masse d'air à ébranler; le seul souffle de la bouche suffit pour les petits tuyaux, comme celui de la flûte traversière; mais pour les tuyaux d'orgues, l'emploi d'un fort soufflet est indispensable. L'extrémité du tuyau peut être fermée ou ouverte. Dans les deux cas il y a des sons produits, seulement le ton est différent. (*Pour les différentes formes de tuyaux*, voyez *l'ouvrage de Chladni*, etc.)

Pour prouver que c'est réellement l'air qui est le corps sonore, on construit divers tuyaux égaux en diamètre, en longueur, en un mot ne différant que par la matière; on les ajuste successivement sur un tuyau conique, garni de sa bouche et de sa lumière : on place chaque tuyau sur les soufflets, on reconnaît qu'il rend le même son, quelle que soit la matière. L'expérience réussit très bien, par exemple, avec des tuyaux de verre, de cuivre, de bois ou de papier. Il est clair qu'il ne s'agit ici que *du ton :* quant au *timbre*, il est particulier à chaque substance.

Le soufflet qu'on voit aujourd'hui dans tous les cabinets de physique est représenté dans la *fig.* 482; c'est un soufflet semblable à celui de la lampe des émailleurs. On le gonfle au moyen de la pédale *A*. Le conduit *C D* porte le vent dans la caisse *M N*, dont la table supérieure est percée de trous *P P'*. Ces trous sont fermés par des soupapes à ressort et sont ouverts au moyen des touches *T T'*. La tige *V V'* est destinée à presser plus ou moins le soufflet.

696. *Théorie des instrumens à vent.* Ce sujet a été soumis à l'analyse mathématique par beaucoup de géomètres, nous ne pourrons le considérer ici que d'une manière très élémentaire.

La théorie que nous présenterons d'abord est celle de Daniel Bernouilli (*Mém. de l'Acad.* 1762); nous indiquerons ensuite les modifications amenées par les progrès de la science.

Comme les vibrations de l'air dans un tuyau sont très petites, il est bien difficile de les déterminer immédiatement par aucune expérience. On est donc réduit à partir d'une hypothèse; si ensuite cette hypothèse, introduite dans le calcul, donne des résultats que l'expérience confirme, elle sera changée en certitude.

Nous appliquerons cette hypothèse aux tuyaux d'orgues, lesquels sont de deux espèces : les uns sont bouchés par un bout, les autres sont ouverts par les deux bouts.

1° Soit d'abord un tuyau *A B C D* (*fig.* 490) bouché par le bout *A B* et ouvert par le bout *C D*; supposons qu'on le fasse résonner en soufflant par l'orifice ouvert; l'air renfermé dans ce tuyau se mettra en vibration, de manière que chacune des couches qui composent la colonne de ce fluide s'approchera et s'éloignera tour à tour du fond. Chaque particule aérienne parcourra un espace d'autant plus grand qu'elle sera plus éloignée du fond *A B*, de sorte que les déplacemens de la couche *b b'* seront plus grands que ceux de la couche *a a'*.

Nous appellerons *vibration* le mouvement total de la colonne d'air qui résulte de l'ensemble des déplacemens. L'expérience prouve que les vibrations sont d'autant plus lentes que le tuyau est plus long, de sorte que si le tuyau devient double, la durée devient double, et le son produit est à l'octave inférieure.

Chaque couche d'air, prise à part, observe l'*isochronisme* dans ses déplacemens grands ou petits, ce qui produit l'identité du ton formé par le même tuyau. Les déplacemens des différentes couches observent le synchronisme, c'est-à-dire qu'elles commencent et finissent dans le même temps, sans quoi elles ne pourraient former un son soutenu; il faut donc que la couche de l'orifice entre dans le tuyau et en sorte alternativement.

Il résulte de là que l'air du tuyau est alternativement un peu condensé et raréfié; mais ces petites condensations et raréfactions alternatives sont inégales aux différens points du tuyau; elles sont les plus grandes au fond *A B*, et vont en diminuant jusqu'à l'orifice *C D*, où elles sont nulles.

Lorsque les vibrations se font de la manière

qui vient d'être exposée, elles forment le son le plus grave qu'on puisse tirer d'un tuyau bouché par un bout. Les tuyaux de cette espèce sont appelés *bourdons*.

2° Soit maintenant un tuyau ouvert par les deux bouts *A H K B* (*fig.* 492); on suppose qu'il se fait dans le milieu du tuyau une séparation *H K*, et l'on admet que les vibrations ont lieu dans chaque moitié du tuyau, comme dans un tuyau bouché par un bout. De sorte que les couches d'air, également éloignées de la couche immobile *H K*, ont des déplacemens égaux et opposés. Suivant cette explication, le ton d'un tuyau cylindrique ouvert par les deux bouts doit être le même que celui d'un tuyau bouché par un bout, et qui n'a que la moitié de la longueur du premier, ce qui est en effet conforme à l'expérience. Bernouilli a reconnu qu'un tuyau dans lequel on enfonce un piton jusqu'au milieu rend sensiblement le même son. Mais, comme dans les tuyaux ouverts le son est doublé avec une parfaite consonnance, et les allées et les venues entièrement harmoniques, ce son est plus fort et plus agréable que celui des tuyaux bouchés par un bout.

3° Considérons enfin un tuyau *A L O B* (*fig.* 493), fermé par les deux bouts, et supposons l'air de son intérieur mis en vibration, on pourra concevoir le tuyau comme composé de deux parties *A L O* et *B L O*; chaque partie formera un tuyau bouché en *A* ou en *B* et ouvert en *L O*; les déplacemens de l'air auront lieu tous dans le même sens, d'un fond à l'autre. Ainsi, tandis que les couches de la partie *A L O* se condenseront en *A*, celles de la partie *B L O* se raréfieront en *B*, et *vice versâ*; la couche d'air du milieu *L O* conservera sa densité naturelle.

Si l'on fait une petite ouverture en *L*, on tirera facilement un son du tuyau *A L O B*; le ton sera le même que celui qui répond au tuyau *A B C D* de la *fig.* 490, en supposant que la longueur de ce dernier soit la moitié de la longueur du tuyau *A L O B* et que dans l'un et l'autre cas le son produit soit le plus grave.

4° Si les vibrations se produisaient toujours ainsi, le même tuyau ne ferait entendre qu'un seul son; mais comme il est prouvé qu'on peut tirer plusieurs sons d'un même tuyau, il faut qu'il y ait plusieurs modes de vibrations. Voici le mécanisme suivant lequel on conçoit qu'une même colonne d'air donne naissance à différens sons :

Qu'on partage un tuyau fermé par un bout en parties égales, mais toujours impaires, et qu'on prenne ces parties deux à deux, à partir du bout fermé, il en restera une finissant au bout ouvert. Il est évident que chaque paire de parties pourra être envisagée comme un tuyau bouché par les deux bouts. Tous ces tuyaux seront consonnans entre eux, et avec le dernier, qui n'a que la moitié de leur longueur, et qui n'est bouché que par un bout.

Soit *A D* (*fig.* 496) un tuyau bouché par le bout *A* et ouvert par le bout *D*; qu'on imagine ce tuyau partagé en cinq parties égales *A E*, *E B*, *B F*, *F C* et *C D*. Dans les vibrations, les couches d'air *B B*, *C C*, resteront immobiles; dans les deux parties *A B* et *B C*, les vibrations se produiront comme dans un tuyau bouché par les deux bouts, et pendant que celles de la partie *A B* iront de droite à gauche, celles de la partie *B C* iront de gauche à droite, et puis celles de *C D* de droite à gauche. Cette alternative aura lieu, quelle que soit la longueur du tuyau. De cette manière toutes les vibrations du tuyau seront *isochrones* et *synchrones*. Dans cette théorie, le ton du tuyau sera le même que celui d'un tuyau bouché par un bout, dont la longueur sera égale à *C D*, et dans lequel les vibrations se feront suivant la loi décrite au commencement de cet article.

La portion *C D* peut, d'après la construction, faire ou 1/3, ou 1/5, ou 1/7, etc., de la longueur totale du tuyau. On sait, d'ailleurs, que les sons les plus graves des tuyaux de différentes longueurs sont en raison réciproque de ces longueurs. Ainsi, les sons qu'on peut successivement tirer d'un même tuyau bouché par un bout doivent être 1, 3, 5, 7, etc. (1), qui forme la suite naturelle des nombres impairs.

Si le son le plus grave est représenté par *ut*$_1$ = 1, les autres seront *sol* $\underset{2}{=}$ 3; *mi* $\underset{3}{=}$ 5; *la* $\underset{3}{=}$ 20/3 < 7; *re* $\underset{4}{=}$ 9; *fa dièse* $\underset{4}{=}$ 11,1 > 11; *la bémol* $\underset{4}{=}$ 12,8 < 13, etc. Les sons graves sont très éloignés; mais les sons aigus sont beaucoup plus rapprochés. Ainsi les nombres 23 et 25 représentent le premier *sol bémol* $\underset{5}{}$ et le second *sol dièse* $\underset{5}{}$.

Daniel Bernouilli, à l'appui de cette dernière théorie, cite une expérience dans laquelle il a tiré successivement les sons 1, 3, 5 et 7, d'une flûte traversière, dont tous les trous latéraux, ainsi que l'extrémité ordinairement ouverte, étaient bouchés.

Les points immobiles *B B* et *C C* sont appelés *nœuds*, et les points intermédiaires *E* et *F ventres* (n° 680). Dans ces derniers points, la densité de l'air ne varie pas. Si l'on y pratique des ouvertures le son ne subit aucune altération.

Comme l'analyse montre que l'intervalle entre deux nœuds est égal à l'espace parcouru par le son

(1) S'il y a un seul nœud de vibration il sera au fond. On aura $\lambda = 2\,l$; λ étant la longueur d'une ondulation condensante ou dilatante, l la longueur du tuyau. S'il y avait 2 nœuds, *fig.* 508 *bis*, on aurait $\lambda = \frac{2}{3}\,l$; pour 3 nœuds $\lambda = \frac{2\,l}{5}$, et en général pour n nœud $\lambda = \frac{2\,l}{2\,n - 1}$. Ainsi les sons sont 1. 3.. 5... $2\,n - 1$.

dans le fluide, pendant la durée d'une de ses vibrations, cet intervalle peut être connu. Voici maintenant une expérience qui est d'accord avec la théorie précédente : un tuyau fermé d'un côté par un piston mobile rend un certain son; il continue à rendre le même son quand on enfonce graduellement le piston de manière à lui faire parcourir, à chaque fois, un espace égal à l'intervalle de deux nœuds.

5° Bernouilli trouve encore qu'il est possible de tirer des tuyaux ouverts par les deux bouts, des sons qui sont dans le rapport des nombres naturels 1, 2, 3, 4, 5, etc.; il est impossible d'en tirer des sons intermédiaires. Il est seulement bon de remarquer que la matière du tuyau doit avoir une certaine rigidité, et la longueur en être au moins dix fois le diamètre; enfin le tuyau ne doit pas être très mince. Dans ce dernier cas, il octavie, c'est-à-dire qu'il est difficile d'en tirer le son fondamental, et qu'il rend le son 2 et les suivans (1).

Si le premier son est *ut*, ces sons seront représentés par $\underset{1}{ut}$, $\underset{2}{sol}$, $\underset{3}{ut}$, $\underset{3}{mi}$, $\underset{3}{sol}$, $\underset{3}{la} = 20/3 < 7$, etc.

Tous les trous étant bouchés, la flûte rendra d'abord un certain son, le plus grave de tous ceux qu'elle peut produire. En variant la manière de souffler, on obtiendra une suite de sons qui formeront la série des nombres naturels 1, 2, 3, 4, 5, 6. On en tirera encore d'autres sons intermédiaires en découvrant successivement un ou plusieurs des trous latéraux.

697. La série des sons rendus par le serpent et le cor, formés de tuyaux courbes, est la même que pour des tuyaux rectilignes de forme et de longueur pareilles.

Ainsi la série pour le corps des sons serait 1, 2, 3, 4, 5, etc. Mais les sons graves 1, 2, etc., diffèrent trop les uns des autres, puisque 1 étant $\underset{1}{ut}$, 2 serait $\underset{2}{ut}$, 3 $\underset{2}{sol}$, etc.; c'est pourquoi l'on a cherché à obtenir les sons plus aigus, 8, 9, 10, 11, 12, etc. 8 étant *ut*, 9 sera *re*, 10 *mi*; 11 serait trop élevé pour le *fa*, on le baisse, en introduisant la main dans le pavillon; 12 sera le *sol*; 13 devra être élevé pour le *la*; 15 sera *si* et 16 $\underset{2}{ut}$. Voilà la gamme complète.

698. Maintenant nous remarquerons que la théorie précédente n'est exacte que lorsqu'on ébranle l'air à plein orifice, par exemple, avec une lame métallique; encore dans ce cas faut-il, comme M. Savart l'a reconnu, que la longueur du tuyau soit très grande relativement au diamètre.

(1) S'il y a un seul nœud il sera au milieu (*fig.* 509). On aura $\lambda = l$; s'il y a 2 nœuds, chaque partie ouverte (*fig.* 509 *bis*), *C D* représentera la moitié d'une ondulation, on aura $\lambda = \frac{l}{2}$. Pour 3 nœuds, on aura $\lambda = \frac{l}{3}$, et en général pour n nœuds $\lambda = \frac{l}{n}$.

Des tuyaux d'orgues, à embouchure de flûte ou à anche, rendent des sons plus graves que n'indique la théorie. La différence est d'autant plus marquée que le diamètre du tuyau est plus grand relativement à la longueur; cet effet tient à ce que la tranche vibrante de l'ouverture est toujours un peu plus courte que les autres. D. Bernouilli l'a constaté en enfonçant un piston dans un tuyau fermé par un bout.

M. Poisson a trouvé, par l'analyse, que le son de la première tranche peut s'abaisser infiniment par des modes d'ébranlement convenables. Ce résultat a été confirmé par les expériences de M. Chanteau.

M. Savart a reconnu que lorsque des masses d'air ébranlées de la même manière sont renfermées dans des tuyaux de formes semblables, les nombres des vibrations qu'elles exécutent sont en raison inverse des dimensions linéaires.

M. Dulong a montré, contrairement à l'opinion reçue, que les nœuds sont placés dans les mêmes positions, dans le même tube, quelle que soit la nature du gaz vibrant.

Il résulte encore des expériences de M. Savart, que dans les tuyaux d'orgues fort longs, la vitesse du courant d'air a peu d'influence sur le nombre des oscillations; que la nature de la substance n'est sans influence que dans le cas où l'épaisseur du tuyau est très grande; par exemple, des tuyaux d'un pied de longueur et de neuf lignes de diamètre, formés de feuilles de papier collées ensemble, et croissant au nombre de deux à douze, rendent des sons qui s'élèvent de $\underset{2}{sol}$ à $\underset{3}{si}$.

699. *Détermination de la vitesse du son dans différens gaz.* Si la théorie précédente était vraie, il suffirait d'avoir la distance entre l'ouverture et le nœud qui vient après, c'est-à-dire qu'il suffirait d'enfoncer le piston mobile jusqu'au nœud le plus rapproché de l'ouverture; c'est ainsi qu'opérait Bernouilli. On trouve de cette manière un nombre plus petit que 333m, cela tient à ce que le fond n'est pas tout-à-fait immobile, et à ce que la densité de l'air n'est pas tout-à-fait invariable à l'ouverture, comme M. Poisson l'a fait voir.

La détermination par la distance entre deux nœuds serait plus exacte; mais la valeur obtenue ainsi pour l'air, serait encore trop petite. Dans la théorie des géomètres, on suppose que les vibrations s'exécutent parallèlement à l'axe du tuyau, ce qui ne paraît pas trop s'accorder avec l'embouchure latérale employée dans ces sortes d'expériences; M. Savart a en effet montré que les lignes nodales ne sont pas perpendiculaires, mais obliques à l'axe du tuyau.

M. Dulong a cherché la vitesse du son dans de l'air, en employant un mode d'ébranlement plus conforme à la théorie. Il a fait vibrer devant une éprouvette (*fig.* 482 *B*) de verre un diapason aux branches duquel il avait fixé un disque métallique; il versait du mercure jusqu'à ce que le son

entendu fût le plus fort. La longueur du tuyau était alors comme dans l'expérience de Bernouilli 1/2 λ, et l'on a dans l'un et l'autre cas $v = n\lambda$. La vitesse obtenue dans cette expérience est encore trop petite. On ne connaît donc pas un moyen exact de déterminer la vitesse du son par les tuyaux sonores.

Si maintenant l'on fait résonner le même tuyau successivement rempli de différens gaz, et si l'on admet que la correction que peut subir λ reste la même, on aura pour deux gaz donnés $V = n\lambda$; $V' = n'\lambda$. D'où $V : V' :: n : n'$. V est connu exactement (nº 675), on en déduira V'. Mais la vitesse du son pour l'air est

$$V = \sqrt{\frac{g\,h\,D}{d}(1 + at) \times q} = n\lambda;$$

pour un autre gaz ce sera

$$V' = \sqrt{\frac{g\,h\,D}{d'}(1 + at') \times q'} = n'\lambda;\ q \text{ et } q'$$

représentant le rapport $\frac{C}{C'}$ et $\frac{C.}{C.'}$ (nº 134). On tirera de ces deux égalités

$$\sqrt{(1 + at)\,q} : \sqrt{\frac{(1 + at')}{d''}q'} :: n : n'.\ d'$$

représentant la densité du gaz par rapport à l'air. q est connu pour l'air, on tirera donc q' de la proportion. C'est ainsi que M. Dulong a obtenu les résultats rapportés p. 66 (*An. de Ch. et de Phys.* t. 41, p. 113).

Quant aux nombres n et n' des vibrations, correspondans aux sons, on pourra les obtenir soit par une lame d'acier (nº 671), soit par le monocorde (nº 683), soit par la syrène (nº 701), soit par l'appareil de M. Savart. Il est inutile de dire qu'on mettra l'appareil employé à l'unisson avec le tuyau sonore qu'on fera réformer. Ces expériences exigent, comme on voit, une oreille un peu exercée.

700. *Instrumens à anches.* Il existe des tuyaux dans lesquels l'air, à son entrée, fait vibrer une lame mince de cuivre jaune appelée *anche*. Ce petit appareil est représenté dans la *fig.* 508; *A B* est la *languette* fixée en *B* sur une pièce cylindrique *E C* de bois de métal, creusé en gouttière. On introduit cet appareil dans une ouverture *D* demi circulaire percée au centre d'un bouchon *H* qui ferme exactement le tuyau *m n p*; l'air introduit par l'ouverture *g* devra s'enfiler dans la gouttière pour s'échapper. Mais vu la petitesse de la gouttière relativement au diamètre du tuyau *n m p*, l'air, du moins s'il entre abondamment, pressera la languette *A B* contre la gouttière et la fermera. Elle reprendra bientôt, en vertu de son élasticité, sa position première, permettra l'entrée de l'air, sera pressée de nouveau, et ainsi de suite. Si l'on fixe l'orifice *g* sur le canal d'un soufflet d'orgue, le jeu de la languette deviendra assez rapide pour que le son produit soit élevé, mais ordinairement assez rauque; c'est pourquoi on réunit d'autres tuyaux qui rendent des sons plus doux, et dont ils augment la force.

Le ton plus ou moins élevé du son rendu par un tuyau à anche, dépend spécialement de la longueur de la languette comptée depuis son point d'attache; il dépend aussi de son élasticité, de sa masse, et de sa courbure, puisqu'en modifiant ces élémens on modifie aussi le ton.

Un gros fil de fer *q t*, recourbé à sa partie inférieure, est introduit à frottement dans le bouchon qui reçoit la languette; ce fil de fer est appelé *rasette;* il peut être plus ou moins enfoncé; et comme il presse par sa partie courbe sur la languette, il est employé à l'allonger ou à la raccourcir, c'est-à-dire à rendre le son plus grave ou plus aigu.

Dans les instrumens à vent (tuyaux d'orgues, hautbois, clarinette, basson (1), où l'anche est en usage, elle n'est jamais employée seule; les ondes sonores qu'elle produit sont renfoncées par leur concentration dans un tuyau auquel elle transmet l'air qu'elle reçoit par sa gouttière.

On conçoit que pour que le son rendu par un tuyau à anche soit agréable, il faut que la masse d'air ébranlée se mette facilement à l'unisson avec elle.

En donnant au tuyau inférieur des formes diverses, en y disposant des lames de diverses substances, on est parvenu à produire des sons analogues à ceux qu'articule la voix humaine.

Le ton d'une anche reste constant, quel que soit le gaz qui la mette en vibration (M. Biot).

Il résulte d'expériences récentes de M. Weber, que la grandeur du porte-vent peut changer le ton; et que le son d'une anche adaptée à son porte-vent n'est ni le son qu'elle rend seul, ni celui que rend le porte-vent.

M. Grenier a fait à l'anche une modification très importante. Il fait la gouttière *B C* en bois ou en cuivre, mais à arêtes vives, et il lui donne la forme d'un parallélipipède creux, et la languette est en laiton. Par une rasette très forte, il la fixe à volonté. Cette languette peut entrer dans la gouttière, de sorte qu'elle ne frappe plus contre une matière solide, mais contre l'air lui-même, et le son en est beaucoup plus doux, plus égal et plus harmonieux.

701. *De la syrène.* C'est ici le lieu de parler de la syrène de M. Gagniard-Latour : la *fig.* 504 la représente.

Voici les diverses parties de cet ingénieux instrument. *A B C D* est une boîte cylindrique de deux pouces et demi environ de diamètre et d'un pouce de hauteur, ayant sa surface supérieure *C D* plane et bien polie.

(1) La pression des lèvres tient dans les trois derniers instrumens lieu de rasette.

E F, tuyau porte-vent.

H K, plateau mobile s'appliquant exactement sur la table *C D*, sans cependant exercer sur celle-ci de frottement sensible. *O O'* ouvertures percées dans la table *C D* et dans le plateau *H K*; elles sont équidistantes entre elles et disposées circulairement.

I, axe autour duquel peut tourner le plateau *H K*. Les ouvertures percées dans le plateau *H K* sont inclinées à l'axe, en sorte que la vitesse du courant de fluide amené par le tuyau *E F*, suffit pour imprimer au plateau un mouvement de rotation plus ou moins rapide.

L, vis sans fin adaptée à la partie supérieure de l'axe *I*.

M, roue dentée mise en mouvement par la vis sans fin.

N, autre roue dentée qui n'avance que d'une dent pour chaque révolution de la roue *M*. Elle est mise en mouvement par un bras de levier fixé à l'axe de la roue *M*. L'axe de chacune de ces roues porte une aiguille. Les deux roues forment le compteur de l'instrument.

En pressant le bouton *P* on fait marcher le compteur, en pressant le bouton *P'* on l'arrête.

Supposons, pour comprendre le jeu de la syrène, qu'il y ait dix trous dans le plateau et un seul dans la table, et, de plus, que le premier fasse un tour en une seconde; chaque trou sera dix fois ouvert et dix fois fermé; et comme l'air, qui est successivement poussé et arrêté, produit à chaque alternative une vibration, il y aura vingt vibrations pour chaque tour.

En augmentant le nombre des trous de la table on augmentera la force du son, sans élever le ton, parce que tous les trous de la table sont ouverts ou fermés ensemble. On le rendra, par exemple, dix fois plus fort, s'il y a dix trous dans la table; on rendra le son de plus en plus aigu, en donnant au plateau supérieur une vitesse de plus en plus grande.

La syrène fournit le moyen de déterminer *le nombre absolu des vibrations correspondantes à un son donné*. Pour cela, on place sur un soufflet un tuyau propre à donner un son déterminé, par exemple celui du diapason qui sert à accorder les instrumens de musique : ensuite on place, sur le même soufflet, à côté de ce tuyau, le porte-vent de la syrène. Avec un peu d'habitude, on parviendra à mettre la syrène à l'unisson avec le tuyau, et quand on l'aura soutenu pendant quelques minutes, on pressera à un instant donné le bouton du compteur et celui d'un bon chronomètre à secondes. Au bout de trois à quatre minutes environ on arrêtera et le chronomètre et le compteur. On connaîtra le temps par le premier instrument, le nombre des vibrations par le second, et la nature du son par le diapason. Nous citerons un exemple : supposons que le plateau fasse vingt tours par seconde; supposons 100 divisions dans chacune des roues, que l'aiguille de la roue *N* soit à 45 divisions, et celle de la roue *M* à 98 divisions du point de départ. On aura 20 $\frac{(45 + 98 \times 100)}{t}$ pour le nombre des vibrations par seconde. *t* étant le temps marqué par le chronomètre.

M. Cagniard a trouvé que pour un égal nombre d'intermittences le son était le même, que le plateau fût mis en mouvement par un courant d'air ou par un courant d'eau. (*Ann. de Chim. et de Phys.*, t. 12.)

702. En plaçant un tube de verre un peu large au-dessus d'une lampe philosophique, on entend des sons bien nets. L'hydrogène brûlé par l'oxigène de l'air laisse un vide dans lequel l'air environnant se précipite, et met l'air en vibration : telle est l'explication de M. de Larive.

703. *Battement*. Cette expérience consiste à faire entendre à la fois deux sons forts et soutenus. De leur concours résulte un troisième son, plus grave que chacun d'eux.

Pour concevoir ce fait, il faut remarquer que, toutes les fois que deux sons existent ensemble, les deux séries de vibrations qui en résultent doivent coïncider à certaines époques périodiques. Le son résultant de cette série de battemens sera un son continu. La découverte de ce phénomène est attribuée à Tartini. Soient, par exemple, deux sons *ut* $\frac{2}{3}$ et *sol*. Le rapport de ces sons est 2 à 3, c'est-à-dire que le premier fait 2 vibrations pendant que le second en fait 3. Le son résultant sera ut_1. La condition de succès dans cette expérience est une justesse parfaite et une certaine durée des sons. Deux sons étant donnés, il est toujours facile de déterminer le son résultant de leur concours. En effet, soient $\frac{db}{BB}$, les deux sons dont il est question. Nous supposons les fractions qui les expriment réduites au même dénominateur. Pendant que le premier ferait *d* vibrations, l'autre en ferait *b*; en sorte que si *a* et *b* étaient premiers entre eux, le son résultant serait 1. En général il sera le plus grand commun diviseur de *a* et de *b*.

Communication des mouvemens vibratoires.

704. La communication des sons se fait fréquemment sous nos yeux; ainsi, plusieurs instrumens placés dans un même salon résonnent dès que l'un de ces instrumens est mis en vibration.

La construction des violons et des autres instrumens à cordes est fondée sur cette communication; une corde tendue sur un morceau de bois étroit, ne produirait que peu d'effet; mais si on la tend sur une table, cette table participe aux vibrations, et les effets sont singulièrement agrandis.

Dans les expériences de Sauveur nous avons vu (n° 685) un exemple de la communication du mouvement.

Pour rendre plus frappante l'influence de la communication du mouvement dans les instrumens, prenez un diapason, faites-le vibrer isolément, et posez-le sur une caisse de piano; aussitôt le son éclatera avec beaucoup plus de force, et même si, avant de poser le diapason, vous attendez qu'il ne vibre plus d'une manière sensible, vous entendrez encore un son très distinct.

Dans un violon le ton est déterminé par la corde. Ce ton se transmet par le chevalet à la table supérieure, et de celle-ci à la table inférieure par le moyen de l'ame, M. Savart est parvenu à rendre sensibles tous les mouvemens qui se produisent dans les diverses parties du violon. Les nombreuses expériences auxquelles ce savant s'est livré l'ont conduit à proposer un violon d'une forme trapézoïdale.

Ainsi, le fait de la communication des mouvemens vibratoires par l'air ou par les corps solides est un fait bien constaté et par les observations et par les expériences.

M. Savart a ajouté les faits importans dont nous allons rapporter quelques-uns. Pour étudier les rapports entre les vibrations des cordes et celles des plaques auxquelles elles sont attachées, il a employé plusieurs appareils parmi lesquels nous choisirons le suivant. Il fixe sur un support *m n* (*fig.* 499) deux planches de sapin *A B* et *A' B'*; puis il fixe une planchette *B' D*, qu'il couvre de sable; enfin, il joint *B D* et *A B* par une corde de violon. En excitant la corde à l'aide d'un archet, successivement dans un sens parallèle ou perpendiculaire à la planchette, il détermine dans cette dernière des lignes nodales. La disposition de la forme de ces lignes montre que la planchette vibre dans le même sens que la corde.

La communication des vibrations se transmet encore à un nombre de plaques ou de verges disposées les unes au-dessous des autres (*fig.* 503). Si l'on ébranle la première verge *m n*, transversalement, à l'aide d'un archet, les vibrations de cette verge se communiquent à toutes les verges qui composent ce système, mais de manière que la seconde est ébranlée longitudinalement, la troisième transversalement, et ainsi de suite.

Toutes les vibrations d'un système sont consonnantes entre elles. Elles agissent les unes sur les autres; ainsi, dans la *fig.* 503, où il y a tout à la fois des vibrations longitudinales et des vibrations transversales, M. Savart a vu les intervalles des nœuds s'agrandir dans les premières et se resserrer dans les secondes.

Dans les grandes masses d'air en vibration, il se forme des surfaces nodales, puisque le son n'y a pas partout la même intensité. C'est ce qu'on peut constater, comme l'a fait M. Savart, en recevant le son dans différens points du lieu où l'on fait entendre un son très intense et soutenu. Ce savant se sert pour cela d'une espèce de cornet acoustique, dont le pavillon est fermé par une membrane qu'on couvre de sable au moment de l'expérience : on juge de l'intensité du son par le mouvement du sable. Si l'on se place à différentes distances du corps vibrant, l'oreille pourra se trouver successivement correspondre à des nœuds et à des ventres.

Organes de l'ouïe et de la voix.

705. L'étude des phénomènes d'optique nous montre avec quel art la nature a combiné les différentes parties de l'œil, comment les perfectionnemens que nous n'avons introduits que lentement dans les lunettes, se trouvent établis d'une manière admirable dans ce même organe. Nous allons voir que la nature n'est pas moins savante dans la disposition des organes de la voix et de l'ouïe.

De l'Ouïe.

706. On distingue dans l'organe de l'ouïe trois parties : *l'oreille externe*, *l'oreille moyenne*, *l'oreille interne*.

L'oreille externe comprend, 1° le *pavillon*, qui est un évasement propre à recueillir les ondes sonores; 2° le *conduit auditif externe*, qui forme, avec le pavillon, une sorte d'entonnoir, et qui présente à son fond la *membrane du tympan*. Cette membrane élastique et médiocrement tendue propage les sons, sans être pourtant essentielle à l'audition, puisque sa rupture n'altère pas sensiblement cette faculté. La membrane du tympan sépare l'oreille externe de *l'oreille moyenne*, appelée aussi *caisse du tympan*. La caisse du tympan, tapissée par une membrane humide, renferme quatre osselets connus sous les noms de *marteau*, d'*enclume*, de *lenticulaire* et d'*étrier*, formant une chaîne continue, dont l'extrémité externe s'attache à la membrane du tympan par le manche du marteau, qui la tend en dedans, et dont l'extrémité interne, constituée par la base de l'étrier, ferme une ouverture ovale, appelée fenêtre ovale, située au fond de la caisse du tympan, qui fait communiquer cette cavité avec la partie de l'oreille interne nommée vestibule-limaçon. Les quatre petits osselets dont nous venons de parler sont mis en mouvement par des muscles particuliers. Un autre trou, appelé fenêtre ronde, s'observe au fond de la caisse du tympan; il est fermé par une membrane analogue à celle du tympan.

La cavité du tympan communique avec le pharynx par le moyen d'un petit conduit (*trompe d'Eustache*) qui y permet l'introduction de l'air extérieur (on croit que, sans cette communication, la perception des sons n'a pas lieu).

Enfin l'oreille interne se compose 1° en avant, du *limaçon*, canal osseux, contourné en spirale, et venant aboutir d'un côté dans la fenêtre ronde, et

s'ouvrir d'un autre côté dans les vestibules; 2° du *vestibule*, cavité assez grande, qui est au milieu; 3° de canaux demi-circulaires, au nombre de trois, communiquant avec le vestibule par cinq orifices, parce que deux des canaux se réunissent à une de leurs extrémités.

Toutes ces cavités de l'oreille interne sont remplies d'une humeur disposée en sacs ou en canaux, c'est dans ce liquide que vient s'épanouir le nerf auditif.

L'ensemble de ces trois parties de l'oreille interne a reçu le nom de *labyrinthe*.

D'après la disposition des différentes parties de l'organe de l'ouïe, on doit concevoir que les ondulations sonores, frappant immédiatement la membrane du tympan, sont transmises par l'air et par la chaîne des osselets aux parois du labyrinthe, et, de là, par l'intermédiaire du liquide, au nerf acoustique. L'existence de toutes ces parties est-elle une condition nécessaire pour que l'audition puisse s'opérer? Non, sans doute; car l'expérience apprend que la membrane du tympan peut être rompue, et les trois premiers osselets détachés, sans que pour cela la faculté d'entendre soit perdue; pourvu toutefois que la membrane qui ferme la fenêtre ronde subsiste, et que l'étrier reste appliqué contre la fenêtre ovale. Mais si l'étrier tombe, et si la membrane qui ferme le labyrinthe se rompt de manière à laisser écouler le liquide qu'il renferme, la surdité se manifeste toujours. D'où il suit que l'existence d'un nerf acoustique et son épanouissement dans un liquide par lequel il reçoit les vibrations sonores, sont les deux seules conditions nécessaires à l'audition.

Quels sont les usages des osselets, de la forme conique du pavillon, etc.? L'examen de la construction de l'organe fait concevoir l'usage de chacune des parties qui le composent. Au reste, les expériences directes sur ce sujet sont difficiles.

Les animaux chez lesquels l'organe est le plus rudimentaire présentent un bulbe dans lequel plonge le nerf auditif. (*Voyez* les ouvrages d'anatomie et de physiologie pour les diverses particularités de l'organe de l'ouïe.)

De la Voix.

707. L'organe de la voix est le *larynx*. Le larynx est une cavité plus grande chez l'homme que chez la femme, se développant surtout à l'âge de la puberté, et formée par des cartilages. L'élasticité et la résistance de ces cartilages maintiennent cette cavité constamment ouverte. Le larynx communique en bas avec la *trachée artère*, qui est un tuyau cartilagino-membraneux, se divisant à sa partie inférieure en deux gros troncs appelés *bronches*, qui se ramifient pour aller distribuer l'air dans tous les points de la masse pulmonaire; le larynx communique en haut avec l'arrière-bouche par une ouverture oblongue d'arrière en avant, appelée *glotte*. L'orifice de la glotte est garni de petits muscles, dont deux sont supérieurs et deux inférieurs. Ces muscles ont reçu le nom de *ligamens de la glotte* ou *cordes de Ferrein*, parce que cet anatomiste les considérait comme produisant la voix à la manière des cordes d'un instrument. L'espace compris entre les ligamens supérieurs et les ligamens inférieurs forme une petite cavité appelée *ventricule du larynx*. La plus ou moins grande contraction des ligamens de la glotte agrandit ou diminue l'étendue de cette ouverture et modifie ainsi les sons. Le larynx peut encore être mu en totalité par des muscles qui s'attachent à la surface externe de ses parois, et à ses différens degrés d'élévation correspondent différens degrés d'acuité des sons vocaux. La *fig.* 513 représente une coupe longitudinale du larynx. *A B C D* sont les membranes de la glotte. La glotte est surmontée d'une membrane cartilagineuse, appelée *épiglotte*, qui, par son élasticité, est maintenue, relevée au-dessus de la glotte, dans l'état ordinaire, pour donner passage à l'air dans les poumons, et qui s'abaisse, dans le moment de la déglutition, pour conduire le bol alimentaire dans l'œsophage et prévenir son introduction dans les voies aériennes, où il produirait la suffocation.

Il est évident, d'après cette description, que l'organe de la voix ne peut être comparé qu'à un instrument à anche libre, où la poitrine fait la fonction de soufflet, la trachée de porte-vent, la glotte d'anche, et la bouche de tuyau pour l'écoulement de l'air.

Il est inutile de réfuter les auteurs qui y ont vu un instrument à cordes : cette étrange opinion ne peut plus être soutenue aujourd'hui.

De plus, il est visible qu'un appareil insufflatoire et dont le pouvoir d'insufflation est seul variable, comme l'est celui des poumons de l'homme, ne paraît pas pouvoir donner la variété infinie de tons que fait entendre la voix humaine. C'est nécessairement dans les modifications de toutes les parties de l'organe et particulièrement de la glotte, qu'il faut chercher l'origine de tous ces tons; aussi M. Magendie a-t-il reconnu (sur les chiens) que, pour les sons graves, les lèvres de la glotte vibraient dans toute leur étendue, tandis que, pour les sons aigus, les lèvres de la glotte se serraient de manière à diminuer la portion vibrante, et à n'offrir qu'une très petite ouverture. Tout cela est parfaitement d'accord avec le jeu des anches.

On peut conclure des expériences de M. Grenier, que l'épiglotte nous permet de régler les sons sans les altérer. On sait que le ton du son rendu par un tuyau à anche change quand la force du vent éprouve de très grandes variations d'intensité. Or, en plaçant au-dessus des anches dans le tuyau vocal, des lamelles de papier, M. Grenier a reconnu que le ton restait sensiblement constant.

Dans les anches le tuyau vocal exerce une influence marquée sur le timbre des sons; dans la voix de l'homme, la bouche et le conduit guttural produisent le même effet. Ainsi le timbre de la voix sera totalement changé, si le conduit guttural est percé au-dessus du larynx; de même, quand un obstacle s'oppose au passage de l'air dans les fosses nasales, on parle du nez. Le résultat est tout différent si le trou est pratiqué au-dessous du larynx; alors, l'air sortant avant d'arriver à la glotte, les sons ne se produisent plus. De même percez le porte-vent d'une anche, et cette anche ne parlera plus. *Voyez* l'ouvrage de M. Magendie, pour les observations qui sont relatives à ce sujet.

L'étendue des diverses voix humaines est d'environ trois octaves; les voix des femmes et des enfans sont plus aiguës que celles des hommes faits, parce que les lèvres de la glotte sont beaucoup plus courtes chez les premiers que chez les derniers, et que le larynx a moins de capacité.

Voici quelques détails empruntés des Leçons d'anatomie de M. Cuvier :

Les animaux à poumons (les mammifères, les oiseaux et les reptiles) sont les seuls qui aient une véritable voix.

Les mammifères et les reptiles n'ont, comme l'homme, qu'une seule glotte placée vers le point où la trachée vient se terminer dans la bouche.

Chez les oiseaux, on trouve, à l'origine de la trachée, au-dessus d'un renflement, appelé larynx inférieur, une lame saillante en forme d'anche; et si l'on coupe le cou à un oiseau criard très près de la tête, il crie comme auparavant.

(*Voyez*, pour les détails plus étendus, l'Anatomie de M. Cuvier et celle de M. Blainville.)

708. Telle a été à peu près la théorie de l'organe vocal jusqu'en 1825. A cette époque, M. Savart a publié un travail dans lequel il propose une nouvelle explication des fonctions de l'organe vocal.

M. Savart remarque d'abord que, pour qu'une anche rende un son, il faut que la languette soit presque en contact avec les parois de la gouttière, afin que l'écoulement de l'air se fasse périodiquement. Cette condition lui paraît difficile à remplir par le larynx.

M. Savart croit que la production des sons dans la voix est analogue à celle du son dans les tuyaux de flûte. Il rappelle que les chasseurs emploient, pour imiter la voix de certains oiseaux, un petit instrument en os, en métal ou en ivoire, et dont la forme est souvent celle de la *fig.* 511, ou de la *fig.* 511 *bis*.

Le diamètre *a b* est de neuf lignes environ, et la hauteur, de quatre lignes. Les chasseurs placent cet instrument entre les dents et les lèvres, et aspirant l'air avec plus ou moins de force, à travers les deux orifices, ils en tirent différens sons. On arrive plus sûrement au même résultat en armant ce petit appareil d'un porte-vent cylindrique (*fig.* 514). On peut obtenir, avec cet instrument ainsi disposé, tous les sons, depuis ut^6 jusqu'à ut^4. Voici comment on explique les sons ainsi produits. Le courant d'air, en traversant les deux orifices, entraîne avec lui une partie de la masse fluide contenue dans la cavité, et en diminue l'élasticité. La pression extérieure réagit sur cette masse et la comprime, jusqu'à ce que, par l'influence du courant, elle subisse une nouvelle raréfaction, suivie d'une nouvelle condensation, etc. On conçoit que ces alternatives d'état étant assez rapprochées, et se répandant dans l'air extérieur, donnent naissance à un son déterminé.

La ressemblance de cet appareil avec celui de l'organe vocal (*fig.* 513), a porté M. Savart à penser qu'il y a aussi similitude dans la manière dont les sons se produisent. D'une autre part, le même savant a reconnu qu'un tuyau ayant les mêmes dimensions que le tuyau vocal et susceptible, comme lui, d'une tension variable dans une partie de son étendue, peut rendre des sons qui embrassent l'étendue de la voix humaine. (*Voy.* le mémoire, *Ann. de Ch. et de Phys.*, t. 30.)

MÉTÉOROLOGIE.

709. On comprend aujourd'hui, sous le nom de météorologie, tous les phénomènes atmosphériques et tous les phénomènes terrestres, dépendant de l'action de la chaleur, de la lumière, de l'électricité et du magnétisme.

On s'occupera d'abord de la pluie, de la neige, de la grêle, de la rosée, des brouillards, des vents, des aérolithes, de l'aurore boréale, etc. On parlera ensuite des températures des climats, des lieux profonds ou élevés, etc.

710. On peut en général concevoir la formation de la pluie de la manière suivante : soient deux masses d'air saturées à des températures inégales, on trouve que le mélange est sursaturé et qu'il doit laisser précipiter de la vapeur.

Supposons qu'on ait pris sur un axe AX des quantités proportionnelles aux températures, et qu'on ait élevé sur cet axe des perpendiculaires proportionnelles aux élasticités de la vapeur, la ligne passant par les extrémités de ces perpendiculaires sera une courbe, convexe vers l'axe AX; elle représentera l'élasticité de la vapeur d'eau. Cette courbe sera telle que si l'on abaisse d'un point B la perpendiculaire BC, celle-ci sera l'élasticité f et AC la température, t correspondante. De même pour le point D on aura $DE = f'$ et $AE = t'$. Soit maintenant un volume d'air saturé de vapeur à la température t, un volume V' saturé à la température t'.

Si l'on néglige la faible différence entre la capacité à t et la capacité à t', si l'on suppose de plus que la somme des volumes est la même après qu'avant le mélange, on aura la température du mélange $= \frac{Vt + V't'}{V + V'} = \theta$, et l'élasticité $= \frac{Vf + V'f'}{V + V'} = F$, or cette élasticité est trop considérable et conséquemment il doit se faire une précipitation de vapeur. Pour le démontrer, il suffit de faire voir que F correspondant à $AF = \theta$ est égale à $\frac{Vf + V'f'}{V + V'}$.

En effet, menons BK parallèle à AX; $OF = OL + FL = BC + OL = F + OL$. Les triangles BOL et BDK donnent $OL : DK :: BL : BK$ ou $OL = \frac{DK \times BL}{DK}$ $DK = f' - f$; $BL = AF - AC = \frac{Vt + V't'}{V + V'} = t$; $BK = t' - t$. En mettant toutes ces valeurs, et en faisant les réductions on arrive à $OF = \frac{Vf + Vf'}{V + V'}$, or OF est évidemment $> FH$, élasticité de la vapeur à la température θ.

La précipitation est d'autant plus considérable que la température est plus élevée. Aussi, dans les pays les plus chauds et dans les saisons les plus chaudes, tombe-t-il de l'eau en plus grande abondance (*Voyez* plus loin).

L'explication précédente de la formation de la pluie suppose l'existence des courans d'air. On a remarqué, en effet, 1° que la pluie est rare sous une direction constante du vent, et qu'elle est fréquente par un changement de vent; 2° que, sous les tropiques, la saison pluvieuse arrive au moment où le soleil approche du zénith, époque de la plus grande variation des vents.

Nous avons dit que l'abaissement du baromètre est en général un indice de mauvais temps; le changement de pression dans l'atmosphère indique une rupture d'équilibre, et conséquemment des agitations plus ou moins fortes.

Il y a des étendues considérables de pays où il ne pleut presque jamais; ce sont les contrées placées dans l'intérieur des continens, et privées de montagnes; les montagnes contribuent au mélange des différentes couches d'air.

Si, dans ces déserts, il se trouve une montagne, elle détermine la précipitation de l'humidité, qui apparaît plus souvent sous forme de rosée.

711. La quantité d'eau qui tombe dans un même pays varie d'une année à l'autre; mais, quand on prend plusieurs groupes d'années, la moyenne va-

rie peu. Du moins voilà ce que M. Arago a remarqué pour Paris, en discutant des observations continuées pendant l'espace de 130 ans.

Il tombe par an 308 centimètres d'eau au Cap français (Saint-Domingue); 205 à Calcutta; 96 à Milan; 56 à Paris; 46 à Pétersbourg.

Il tombe d'autant plus d'eau dans un pays, qu'il est plus près de l'équateur, ce qui s'accorde avec les observations de M. de Humboldt, qui prouvent que l'air est d'autant plus humide, que le lieu est plus rapproché de l'équateur. Il faut dire cependant qu'il pleut très peu dans la Basse-Égypte.

Suivant M. Gasparin, il tombe dans le nord-est de l'Europe le maximum de pluie en été, et dans le sud-ouest en automne.

L'hydromètre (instrument propre à mesurer la quantité d'eau tombée) consiste en un entonnoir évasé dont la pointe plonge dans un vase fermé (*fig.* 495). De temps à autre, on reçoit l'eau du vase inférieur dans un autre vase dont la capacité a pour mesure la surface de l'entonnoir multipliée par un centimètre, en sorte que le nombre de ces mesures indique le nombre de centimètres d'eau tombée dans le lieu des observations. Deux instrumens semblables sont placés à l'Observatoire de Paris, l'un dans la cour, l'autre au haut de l'Observatoire. L'hydromètre placé dans la cour indique toujours une quantité d'eau plus grande, différence qui tient à l'inclinaison de la pluie, qui est d'autant moindre qu'elle approche plus de la surface de la terre. On dit aussi que les gouttes d'eau qui viennent des couches supérieures, condensent de la vapeur dans les couches inférieures plus chaudes.

A égalité de latitude, la quantité de pluie qui tombe dans un pays, est modifiée par la localité, la forme, etc., de ce pays. Ainsi les montagnes d'un pays voisin de la mer détermineront le refroidissement de l'air saturé apporté par la mer, et conséquemment la précipitation d'une quantité d'eau considérable. C'est ainsi qu'on explique les pluies fréquentes de la Norwège, des côtes occidentales et orientales de l'Afrique, la sécheresse des environs de Madrid. L'air qui vient de la mer abandonne la majeure partie de son humidité sur les sommets froids des montagnes qui bornent le plateau central de cette grande ville (1).

712. D'après Saussure, la vapeur, au moment où elle se précipite de l'air, se transforme en une multitude de petites sphères creuses, qu'on a désignées sous le nom de *vésicules*. Les nuages et les brouillards sont formés par un assemblage de ces vésicules. Saussure les a examinées à l'aide d'une lentille; il a reconnu qu'elles étaient sphériques; de plus, placé dans un nuage, il a vu les particules dont ce nuage était composé flotter et voltiger dans l'air avec une légèreté qui prouvait qu'elles étaient creuses; Saussure s'est aussi assuré que la fumée qui se forme dans l'air au-dessus d'un liquide noir est composée de grains arrondis et blanchâtres. On sait depuis long-temps que les nuages ne forment pas d'arc-en-ciel, ce qui vient encore à l'appui de l'opinion qui les regarde comme composés de vésicules creuses.

Il est assez difficile de concevoir comment ces vésicules dont l'enveloppe est liquide puissent se maintenir dans l'atmosphère. M. Gay-Lussac pense que les courans d'air chaud qui s'élèvent nécessairement de la surface de la terre, facilitent cette suspension. Fresnel pensait que la chaleur solaire absorbée par le nuage, le rendait plus léger que l'air environnant (*Ann. de Chim. et de Ph.*, t. 21) : c'est une question qui demande des observations.

Comment expliquer la chute de grosses gouttes de pluie qu'on observe par un ciel serein entre les tropiques, dans l'intérieur des terres (M. de Humboldt), ou en pleine mer (M. Beechey)?

On voit quelquefois en Europe, par un temps froid et pur, en plein midi des petits glaçons. M. Arago engage les voyageurs à voir si la chute de la pluie à l'équateur par un ciel pur, ne coïncide pas avec la présence d'un halos. (*Annuaire*, 1835.)

713. *De la Rosée. — De la gelée blanche.* L'histoire complète de la rosée a été faite, n° 161. L'explication de la formation de la gelée blanche, du givre, est la même que celle que nous avons donnée de la formation de la glace artificielle.

714. *Des Brouillards.* 1° Les brouillards, en général, sont une suite du refroidissement nocturne de l'atmosphère. L'air par son rapide refroidissement, se trouvant sursaturé, une partie de la vapeur qu'il renferme se précipite et forme un nuage. Voilà la formation des brouillards ordinaires.

L'augmentation de chaleur qui a lieu pendant le jour, par suite de la présence du soleil sur l'horizon, fait souvent évanouir le brouillard formé pendant la nuit, et rend à l'air sa transparence primitive. Cela est tout simple, puisque la quantité de vapeur que peut admettre l'air devient plus considérable à mesure que la température de ce fluide est plus élevée (n° 214).

2° Les lacs, les rivières, etc., présentent aussi souvent, le matin, des brouillards. L'air pendant la nuit est plus froid que la terre. Les couches d'air en contact avec l'eau s'échauffent et se saturent de vapeur. Le mélange de la vapeur avec ces couches d'air, l'élévation de la température les rendent spécifiquement plus légères. Elles s'élèvent, et, rencontrant des couches d'air froid, elles se refroidissent aussi et laissent précipiter de la vapeur. Le nuage résultant de cette précipitation ne doit se montrer qu'à une faible hauteur à cause de l'uniformité de température qui s'établit bientôt. De plus, on voit dans cette explication pourquoi la pluie ou une grande agitation de l'air s'oppose

(1) *Voy.* l'influence des vents sur l'état hygrométrique de l'air de la Sibérie. *Frag. de Géol.* de M. de Humboldt, t. 2.

à la formation des brouillards au-dessus des eaux.

Dans les régions équinoxiales, des brouillards se maintiennent souvent pendant une partie de l'année. C'est ce qui arriva en 1785 à Bahia (M. Dorta). Un brouillard se forma au mois d'avril, en 1786, à Rio-Janeiro, et ne disparut qu'à la fin de l'année. M. de Humboldt rapporte aussi que Lima est souvent couvert de brouillards la moitié de l'année, surtout le soir et le matin, et que, sur la presque totalité de la côte, ils remplacent les pluies, qui sont extrêmement rares dans ces contrées.

D'épais brouillards règnent souvent, même pendant les mois les plus chauds, sur les mers polaires; ils sont tellement épais que la vue ne s'y étend qu'à la distance de quelques pas. La mer qui baigne les côtes du Spitzberg et du Groenland est très souvent aussi couverte de brouillards épais.

3° Il y a aussi des brouillards plus rares, et dont la cause n'est pas bien connue. En 1783, un brouillard de cette espèce couvrit toute l'Europe pendant près de deux mois; le 18 août 1821, un brouillard qui affaiblissait le soleil au point qu'on pouvait regarder cet astre à l'œil nu, fut d'abord observé, dans le comté d'Essex en Angleterre. Le même brouillard fut observé entre neuf et dix heures du matin dans le comté de Sussex. Il se manifesta à Paris, mais seulement vers six heures du soir. M. Flaugergues le remarqua le 24 au matin, en Dauphiné; le brouillard ne se dissipa que le 30 août.

Le 22 mai, en 1822, vers cinq heures du soir, il se répandit à Paris et dans les environs un brouillard ayant l'odeur du gaz nitreux; à dix heures du soir il avait disparu.

M. Berg, officier russe, parle d'une espèce de brouillard qu'il nomme fumée. Ce brouillard paraît sortir de la mer dans les temps orageux, et s'élever jusqu'à cent pieds de hauteur. D'après ce même voyageur, le brouillard dont il est ici question ne se manifeste que lorsque la température de la mer est élevée à 25 degrés. Ne serait-ce pas un dégagement de gaz carbonique ou d'air, qui déposerait, par le contact de l'atmosphère, une partie de sa vapeur?

715. *De la Neige.* Lorsque la température de l'air en s'abaissant est arrivée au degré de la congélation, les gouttes d'eau qui résultent de la condensation des vésicules dont sont formés les nuages, se convertissent en neige et forment dans leur chute par leur réunion, des étoiles à six rayons, si la cristallisation s'en opère au milieu d'un air calme; et au contraire ne forment que des flocons irréguliers dans un air agité.

L'explication de la formation de la neige sera peu différente dans le cas où l'on suppose, avec Fresnel, les nuages formés de petits glaçons.

La neige rouge des pôles et des Alpes n'est qu'un petit champignon du genre *uredo*.

M. le capitaine Scoresby a observé avec soin, dans les régions boréales, les diverses formes qu'affecte la neige; il en compte 48. La *fig.* 510 présente les principales.

On y voit en général une tendance vers la forme à six rayons, observée depuis si longtemps.

La neige tombe quelquefois en si grande quantité dans le nord, qu'elle couvre des habitations entières. Il ne neige jamais à l'équateur.

Voyez plus loin les limites des neiges perpétuelles.

716. *De la grêle.* La grêle, qui paraît avoir une grande analogie avec la neige, en diffère surtout par l'époque de sa formation.

Dans l'ancienne explication, on supposait que la grêle devait son origine à une eau de pluie dont les gouttes s'étaient congelées au haut de l'atmosphère. Ces globules, dans leur chute, rencontraient de nouvelles gouttes liquides, dont les molécules, congelées par leur contact, s'arrangeaient autour d'elles par couches concentriques, et augmentaient ainsi leur volume.

Mais cette explication avait contre elle une difficulté assez grande; c'est que l'intervalle qui existe en général entre la surface de la terre et les nuages ne paraît pas assez considérable pour que les grains de grêle acquièrent un accroissement de poids qui va quelquefois jusqu'à cinquante grammes ou davantage.

L'explication proposée par Volta est ingénieuse; mais on manque d'observations sur ce sujet.

717. *Trombe.* La trombe se montre en mer et sur la terre; tantôt elle semble sortir du sein de la mer, et s'élève jusqu'aux nuages, tantôt elle descend des nuages jusqu'à terre.

C'est une colonne d'eau conique qui tourne sur elle-même avec une grande vitesse; elle a quelquefois jusqu'à plus de deux cents mètres de base. Elle est très commune entre les tropiques : les navigateurs passent rarement près des côtes de Guinée sans en apercevoir plusieurs.

Les trombes produisent des effets terribles; elles déracinent les arbres, renversent les faibles habitations, soulèvent les voitures, etc.

On peut se faire une idée des trombes par les tourbillons de poussière qui se forment tout à coup, en été, sur les routes, et qui tournent sur eux-mêmes avec une grande rapidité.

718. *Halos.* Les halos sont des couronnes lumineuses presque circulaires, qui se montrent quelquefois autour du soleil et de la lune, surtout dans les parages élevés. Ordinairement il n'y en a qu'un seul, dont le diamètre constant est d'environ 45°; s'il s'en forme un second, il est plus pâle et le diamètre en est double. On n'a pas observé de couleurs dans les halos de la lune. Lorsque les halos du soleil sont colorés, le rouge est au-dedans, et toujours plus prononcé, l'indigo au dehors; la lar-

geur de la bande colorée, du rouge à l'indigo, est de 1 degré. Sous un ciel brumeux, le halos a ordinairement une couleur cendrée.

Descartes a supposé les halos formés de petites étoiles de neige qui deviennent transparentes et convexes par un commencement de fusion. Le phénomène serait dans cette hypothèse ramené à l'arc-en-ciel; Huyghens, de petites sphères; enfin, Mariotte, considère les halos comme composés de petits prismes de glace, dont l'angle réfringent serait de 60°.

On se rend raison du phénomène dans cette dernière hypothèse. Les prismes dont il est question doivent être tournés dans toutes les directions. Il y en aura nécessairement un certain nombre qui auront leur angle réfringent opposé au soleil (*fig.* 36, pl. 17). De plus ceux qui seront dans cette condition de donner une déviation minimum pour les rayons qui les traverseront, pourront envoyer de la lumière à un observateur placé en *O*. Nous savons en outre que dans cette position le triangle $B\,i\,i'$ formé par le rayon réfracté et les côtés du prisme est isocèle; que l'angle de réfraction est la moitié de l'angle réfringent du prisme; dans le cas actuel il sera de 30°, d'où l'on tire 41° pour l'angle d'incidence; mais l'angle de déviation égale $S\,O\,D = 2\,i - B = 2.\,41° - 60° = 22°$. Ainsi le diamètre du halos serait dans cette hypothèse 44°.

La plus grande réfrangibilité des rayons violets donnera pour ceux-ci une déviation plus grande; ainsi la bande violette sera en dehors. Enfin, le diamètre du soleil qui est de 30′ augmentera encore celui du halos. On voit donc, par ces considérations, que l'hypothèse de Mariotte conduit à une grandeur apparente qui s'accorde assez avec l'observation. De plus M. Arago a constaté que la lumière qui vient des halos est polarisée par réfraction. (*Bull. de la Soc. Phylom.*, 1825.)

Ce que nous venons de dire est relatif au halos intérieur; on observe quelquefois un second halos dont les dimensions ne sont pas aussi bien connues.

719. *Des Aérolithes.* Quelques détails sur les aérolithes et les masses de fer isolées ne seront peut-être pas déplacés ici.

Quoique le fer ait une grande affinité pour l'oxigène, il se trouve cependant à l'état non oxidé dans la nature, à la vérité en masses peu considérables. On en trouve dans plusieurs lieux.

La prompte oxidation que le fer subit sous nos yeux doit faire penser que ces masses ferrugineuses ne sont exposées à l'action de l'air que depuis un petit nombre d'années. Aussi les peuples des contrées qui en possèdent les croient-ils tombées du ciel. Cette opinion nous paraît d'autant plus fondée, que depuis 1785 on a observé assez fréquemment la chute des pierres; de plus on a remarqué une grande ressemblance entre les pierres tombées récemment et les masses anciennement connues. Toutes sont caverneuses, et présentent à leur surface une matière vitreuse. On conçoit bien et l'oxidation du métal et la formation du verre, puisque toutes les aérolithes au moment de leur chute, qui se fait avec une grande vitesse, sont à une température assez élevée pour paraître lumineuse.

D'après les analyses de MM. Howard, Klaproth, Vauquelin, Stromeyer, Laugier, la composition chimique des aérolithes est environ 50 de silice, 25 de fer presque entièrement oxidé; 5,5 de manganèse; 4,5 de soufre; 2,5 de nickel métallique; 1,5 de manganèse oxidé; 1,5 de chrôme et des traces de cobalt; leur pesanteur spécifique est 3,6 environ. L'état des différentes substances qui composent une aérolithe doit dépendre du volume; l'oxidation d'une pierre d'un petit volume doit être complète, tandis qu'une pierre d'un poids considérable présentera du fer, du manganèse et même du silicium à l'état de pureté. Ainsi la masse de fer de Sibérie (connue sous le nom de fer de Pallas), qui est formée de toutes les substances qui entrent dans la composition des aérolithes, renferme beaucoup de fer à l'état métallique.

La chute des pierres (aérolithes) est un fait incontestable; l'identité de composition des masses de fer isolées et des aérolithes leur assigne une origine commune. Sont-elles lancées par des volcans lunaires (1) ou des volcans terrestres, ou bien proviennent-elles des débris des petites planètes, qui, se trouvant engagées dans l'atmosphère, et qui, animées d'une immense vitesse, s'y enflamment par leur frottement contre l'air (2), et tombent par leur pesanteur? C'est une question sur laquelle il ne nous appartient pas de prononcer.

On rapporte beaucoup d'exemples d'une pluie rouge, de matière coagulée analogue à du sang; l'aspect vitreux du météore a probablement induit en erreur les observateurs. Il est tombé en Perse, près du mont Ararath, en 1827, une poussière qui a été reconnue pour un lichen.

La question de la chute des crapauds a excité récemment des discussions réitérées. Nous ne croyons pas devoir entretenir nos lecteurs de ce sujet.

720. Le feu Saint-Elme se montre en mer pendant les tempêtes, sous la forme d'un feu violet, très mobile, étincelant, se dirigeant vers les pointes, etc.

La production des feux follets qui apparaissent au-dessus des cimetières et des marais, etc., a été attribuée à la réaction des matières alcalines du sol, de l'eau et du phosphore, que renferment la matière cérébrale de l'homme, certaines parties de poissons, etc.

(1) On a calculé qu'il suffisait pour cela d'une force quadruple de celle d'un boulet lancé par 12 livres de poudre.

(2) Ces météores enflammés ont reçu le nom de bolides. On en voit tomber fréquemment.

Les étoiles filantes ont beaucoup fixé l'attention dans ces derniers temps; il paraît qu'elles viennent du dehors de l'atmosphère de la terre; on en aperçoit quelquefois des milliers par heure; on les a surtout observées du 11 au 13 novembre. (Voyez l'*Annuaire*, 1836.)

721. *Aurore boréale.* Quoiqu'un traité élémentaire ne doive être que l'histoire des faits les mieux connus, nous donnerons cependant quelques détails sur l'aurore boréale, phénomène sur lequel des observations récentes ont jeté quelque lumière.

L'aurore boréale se montre dans notre hémisphère du côté nord, en tirant un peu vers l'ouest. Ordinairement elle s'annonce d'abord par une espèce de brouillard, qui présente dans un temps calme à peu près la forme d'un segment de cercle, dont la partie convexe est le point le plus élevé.

Ce segment paraît bientôt bordé d'arcs concentriques, séparés par des bandes obscures. Il part de la partie obscure du segment des jets de lumière qui se renouvellent quelquefois avec tant de rapidité, que le segment semble être en mouvement. Enfin, le phénomène paraît dans toute sa magnificence : le segment a acquis sa plus grande extension. Il se manifeste au zénith une couronne enflammée qui paraît être le centre vers lequel tous les mouvemens se dirigent. Ensuite le phénomène diminue graduellement, les jets de lumière et les vibrations sont plus rares; toute la lumière se concentre vers le nord, enfin tout disparaît. Toutes les aurores boréales ne présentent pas ces diverses particularités, il s'agit ici d'une grande aurore boréale.

L'aurore boréale se passe dans notre atmosphère, puisqu'elle est emportée avec elle dans le mouvement de rotation du globe.

Différentes explications ont été proposées relativement à l'aurore boréale par Franklin, par Mairan, par Euler, etc.

Les physiciens pensent aujourd'hui qu'il y a une liaison intime entre les causes de l'aurore boréale et celles du magnétisme terrestre. En effet, outre la correspondance déjà remarquée entre l'apparition de l'aurore boréale et les mouvemens irréguliers de l'aiguille, et qui sont d'autant plus sensibles que l'aurore boréale paraît plus active et plus répandue, on a reconnu 1° que les arcs concentriques reposent sur des points également éloignés du méridien magnétique; 2° que le point le plus élevé de chaque arc se trouve dans ce méridien; 3° que le point où les rayons lumineux partis de l'horizon se réunissent, est précisément celui vers lequel se dirige une aiguille aimantée suspendue par son centre de gravité.

Il n'est pas nécessaire que l'aurore boréale soit visible dans un lieu, pour que la boussole y soit agitée; M. Arago à Paris, M. Kupffer à Kasan, ont observé une agitation pareille le 13 novembre 1835. A la même époque, une aurore boréale était visible dans le nord de l'Écosse, tandis qu'on ne l'apercevait ni de Paris ni de Kasan.

Il est bien démontré par des expériences suivies à l'Observatoire de Paris, que l'aurore boréale altère la déclinaison, l'inclinaison et l'intensité de l'aiguille aimantée.

Il faut convenir qu'il est difficile de ne pas voir dans ces diverses circonstances, des indices d'un lien caché existant entre l'aurore boréale et les phénomènes magnétiques.

M. Biot, dans son voyage aux îles Schetland, a observé une grande aurore boréale : il n'a reconnu aucune trace de polarisation dans la lumière qui en émanait; d'où il a conclu que la lumière était produite au point d'où partaient les jets lumineux. Le même savant a proposé une théorie de l'aurore boréale que les bornes de cet ouvrage ne nous permettent pas de rapporter.

Des Vents.

722. La cause principale des vents, du moins la cause des vents généraux, est l'inégale distribution de la chaleur dans l'atmosphère. Les quantités d'air transportées par les courans opposés sont sensiblement égales, puisque la hauteur du baromètre est à peu près la même sur tous les points du globe.

On distingue plusieurs espèces de vents. On appelle vents *généraux* ou vents *alisés* ceux dont la direction est constante; ils règnent entre les tropiques.

Les vents *périodiques* ou *moussons* soufflent dans une certaine direction pendant six mois et sont suivis de vents contraires d'une égale durée. Ils règnent surtout dans la zone torride ou près de ses limites; ils présentent des anomalies comme les vents alisés.

On donne le nom de vents irréguliers à ceux qui soufflent de différens côtés, sans observer ni époque, ni durée déterminée : ce sont les vents les plus ordinaires dans les zones tempérées. Il arrive assez communément que plusieurs de ces vents soufflent en même temps dans des directions contraires à des hauteurs différentes. Pour s'en convaincre, il suffit de jeter les yeux sur les nuages pendant un jour où le ciel est assez pur.

723. Il suffit du plus petit changement de densité dans une partie d'une masse fluide, pour y déterminer des courans. Par exemple, dans un appartement à cheminée, l'air, échauffé par le foyer et rendu conséquemment plus léger; s'échappe en partie par le tuyau de la cheminée, et l'autre va gagner le haut de l'appartement, en même temps que l'air du dehors arrive pour remplacer l'air ascendant, et il en résulte une succession non interrompue de deux courans contraires, l'un,

inférieur, qui se dirige de la porte vers la cheminée, l'autre, supérieur, qui s'éloigne de cette dernière. L'existence de ces deux courans se constate en plaçant une bougie tour à tour dans le bas et dans le haut de l'appartement. On voit la flamme s'incliner dans les deux directions indiquées.

On s'est appuyé sur cette expérience pour expliquer la formation du vent *est* : l'air de la zone torride, échauffé fortement par le contact de la terre, s'élève et se répand vers les pôles. L'air froid des pôles se dirige vers l'équateur pour remplacer le vide laissé par l'ascension d'une partie de l'air de l'équateur. Il se forme donc dans chaque hémisphère deux courans, l'un, supérieur, qui se porte de l'équateur aux pôles, et l'autre, inférieur, qui va des pôles à l'équateur.

Maintenant les molécules d'air de chaque zone ont une vitesse de rotation qui est d'autant plus petite que la zone est plus rapprochée des pôles; les molécules du courant inférieur, arrivées à l'équateur, ont donc une vitesse moindre que celle du point correspondant pris à la surface de la terre. Un observateur, placé à l'équateur, frappera donc ces molécules avec un excès de vitesse, et, rapportant l'excès de sa propre vitesse en sens opposé, il croira recevoir l'impression d'un vent dirigé d'est à l'ouest, puisque le mouvement de la terre se fait de l'ouest à l'est. On conçoit, par le courant supérieur, que, chacune de ces molécules possédant une vitesse plus grande que celle des points de la terre au-dessus desquels elle arrive, doit produire l'effet d'un vent d'ouest réel, tandis que le vent inférieur n'est qu'une apparence.

Les vents alisés ne suivent une direction constante qu'au milieu des grandes mers; dans le voisinage des continens, ils présentent des anomalies, dans l'examen desquelles nous ne pouvons entrer. Nous ne citerons qu'un exemple. Sur les côtes d'Afrique, entre les îles Canaries et le Cap-Vert, il règne un vent d'ouest au lieu d'un vent d'est : ce qui tient à la précipitation de l'air de la mer vers la terre, pour remplir le vide produit au-dessus du vaste désert de Sahara.

724. L'influence des vents alisés est très remarquable. Ces vents soufflent de l'est à l'ouest à travers le continent de l'Afrique, rempli de déserts, et produisent sur sa côte occidentale une chaleur plus intense que celle que l'on éprouve sur sa côte orientale. Ils passent ensuite sur l'Océan atlantique, où ils sont considérablement rafraîchis, traversent l'Amérique méridionale, etc.

L'explication de la périodicité des vents ou brises qui soufflent près des bords de la mer est très facile. La température de la mer n'éprouvant jamais de variations aussi grandes que celles de la terre, il suit de là que pendant la nuit la mer doit être plus chaude que la terre. L'air de la mer, rendu plus léger, se répand par un courant supérieur sur le continent, et l'air du continent se porte par un courant inférieur sur la mer. Pendant le jour, la mer étant plus froide, la direction des courans est inverse.

Les vents diminuent les différences que présenteraient les températures des continens et des mers.

Les terres qui avoisinent les mers n'éprouvent pas des étés aussi chauds ni des hivers aussi rigoureux que les pays placés sous les mêmes latitudes dans l'intérieur des terres. C'est ainsi qu'on peut cultiver l'olivier sur les côtes de la Bretagne, tandis que la culture en est impossible dans des contrées beaucoup plus méridionales.

La dilatation de l'air est la cause principale des vents; mais les vents irréguliers doivent être souvent produits par la condensation subite d'une grande quantité de la vapeur contenue dans l'air. Alors le vide formé aspire nécessairement l'air environnant. Il a été en effet constaté que des lieux vers lesquels se dirige un vent violent ou un ouragan, le ressentent avant les lieux d'où il semble venir.

725. La vitesse du vent est très variable. Kraaf l'a trouvée à Pétersbourg, un jour, de 109 pieds, un autre jour, de 129 pieds par seconde; elle peut être beaucoup plus grande et beaucoup plus petite.

Quand le vent a une vitesse très grande, il prend le nom d'ouragan; cette vitesse est quelquefois de plus de vingt lieues à l'heure. Les ouragans les plus violens se font surtout sentir dans les climats chauds; ils renversent les arbres et les édifices les plus solides : ils lancent à des distances considérables des masses que plusieurs hommes pourraient à peine remuer.

Franklin et d'autres savans ont constaté qu'un ouragan souffle dans un sens et se propage dans un sens contraire. La réaction de l'air doit donc être la cause probable des ouragans.

D'après le n° 711, les vents doivent exercer une influence marquée sur la production de la pluie, et sur l'état hygrométrique d'un pays.

A Paris, les vents d'ouest, qui viennent de la mer, sont les plus pluvieux, et les vents d'est, qui ont traversé différens climats, les plus secs.

Lorsque les vents du S. O. ont long-temps soufflé sur la Sibérie on trouve dans cette contrée l'hygromètre de Saussure à 29°. Le résultat a été constaté par M. G. Rose avec l'appareil de M. August. (*Fragm.*, t. 2, p. 375.)

Il ressort d'un mémoire de M. Bouvard, que pendant quatorze années la plus petite hauteur moyenne $0^m,753$ du baromètre correspond à Paris aux vents sud-sud-ouest, et la plus grande $0^m,760$ aux vents nord-nord-est. La différence est de $0^m,007$.

La moyenne à Paris est sensiblement de $0^m,756$.

La période barométrique diurne est presque nulle par le vent du sud et atteint son maximum par le vent du nord.

Quoiqu'il y ait peu d'observations faites dans la même vue, on reconnaît déjà par celles de M. Gam-

bart à Marseille, que l'influence des vents n'est pas la même dans tous les pays.

La violence des vents s'affaiblit de l'équateur aux pôles, où l'agitation de l'air, qui a lieu dans différens sens, est à peine sensible.

Températures des différens climats.

726. La *température moyenne* d'un lieu, pendant un jour, est la moyenne des températures correspondantes à tous les instans dont ce jour se compose.

Pour avoir la moyenne d'un mois, on divise la somme des moyennes de tous les jours, par le nombre des jours. La moyenne de l'année est la somme des moyennes des mois divisée par 12.

M. de Humboldt, par une discussion approfondie de nombreuses températures prises à Paris et à l'équateur, a reconnu que la demi-somme des températures *maximum* et *minimum* de chaque jour (celles de deux heures après midi et du lever du soleil) ne diffère que peu de la moyenne rigoureuse et peut la remplacer.

La moyenne, calculée de cette manière, l'emporte en général de 1/3 de degré sur la moyenne réelle.

La température *maximum* pour toute la terre est à deux heures, un peu plus tard pour les jours les plus longs, et un peu plus tôt pour les plus courts; tandis que l'action instantanée du soleil est à son *maximum* toujours à midi. De même que la température maximum de l'année est pour Paris au 15 juillet, et le minimum au 14 janvier, quoique le maximum du soleil soit au solstice d'été et le minimum au solstice d'hiver, c'est-à-dire 25 jours plus tôt. L'instant qui précède le lever du soleil fournit la température *minimum* (1).

De plus, la température (du moins entre les parallèles 46° et 48°) du coucher du soleil est à peu près la température moyenne du jour.

Enfin les températures d'octobre et d'avril fournissent sensiblement la température moyenne de l'année.

Voici quelques nombres :

	Tempér. moyenne.	Lat.
Pondichéry.	29°,3	11°56′n.
Batavia.	27°,0	6°12′s.
Ile de France.	24°,9	20°10′s.
Palerme.	17°,5	38°7′ n.

(1) Si l'on réunit toutes les observations faites pendant seize ans par M. Bouvard à Paris, on trouve que le *minimum* moyen correspond à quatre heures du matin, et le *maximum* moyen 14°, 47 à deux heures. Huit heures 20′ du matin et du soir donne 10°, 67 qui est la moyenne. Il s'agit ici de la moyenne de toute l'année. Si l'on voulait la moyenne du matin en janvier ce serait dix heures, et pour juillet sept heures.

	Tempér. moyenne.	Lat.
Alger.	17°,5	36°49′n.
Naples.	16°,3	40°51′n.
Rome.	15°,8	41°54′n.
Pékin.	12°,5	39°54′n.
Philadelphie.	11°,9	39°57′n.
Paris.	10°,6	48°50′n.
Londres.	10°,5	51°31′n.
Vienne.	10°,3	48°12′n.
Bruxelles.	10°,3	50°51′n.
Strasbourg.	9°,8	48°35′n.
Genève.	9°,1	46°12′n.
Édimbourg.	8°,8	55°58′n.
Copenhague.	7°,6	55°41′n.
Stockholm.	6°,7	59°20′n.
Pétersbourg.		59°55′n.
Irkoutsk.	0°,0 (Sibérie)	52°16′n.
Cap-Nord.	0°,0	71°10′n.
Fort-Entreprice.	0°,5	64°29′n.
Ile-Melleville.	18°,0	74° 7′n.

Les températures moyennes des années présentent beaucoup moins de différence qu'on serait tenté de le supposer d'après le témoignage des sens et des produits variables de la culture. Les différences extrêmes atteignent à peine 2 à 3 degrés.

Les différences entre les moyennes de janvier s'élèvent à 7°; pour le mois d'août, elles ne vont que rarement à 4°.

La différence entre le minimum et le maximum d'un même jour est d'autant plus considérable que la température moyenne est plus élevée.

727. *Des lignes isothermes* (1). Pour tracer les lignes isothermes, on cherche les points du globe dont les températures moyennes se rapprochent le plus de ces températures 0°, 5°, 10° ou 15°. On reconnaît au premier abord si les lignes passent au sud ou au nord de tel ou tel endroit. Pour connaître la distance précise en latitude, on a recours aux méthodes ordinaires d'interpolation.

La différence entre les températures de deux lieux situés sur un même méridien croît de l'équateur aux pôles. Elle est en France d'environ 1° pour 40 lieues communes.

La *fig.* 481 représente les lignes isothermes. La seule inspection de cette figure montre combien ces lignes diffèrent des parallèles (2), et que leurs sommets convexes en Europe sont presque toujours situés sur le même méridien. Dans la zone

(1) M. Humboldt, Société d'Arcueil, t. 3. (*Voy.* un nouvel ouvrage de ce savant intitulé : *Considérations sur la Température et l'état hygrométrique de l'air dans quelques parties de l'Asie.*)

(2) Si la surface de la terre était une courbe uniforme, si la matière en était homogène, de même couleur, etc., les lignes isothères, isothermes, seraient parallèles à l'équateur. (*Fragmens de Géologie*, t. 2, p. 398.)

torride, au-dessous du parallèle de 30°, les lignes isothermes deviennent peu à peu parallèles entre elles et à l'équateur terrestre ; ainsi à latitude égale, le climat d'Europe est plus chaud que les climats d'Asie et d'Amérique.

728. A cette observation, faite depuis plus d'un siècle, qu'en avançant de 70° en longitude à l'est ou à l'ouest du méridien de Paris le climat est plus froid, il faut ajouter que les différences entre les températures des lieux situés sous les mêmes parallèles ne sont pas égales dans toutes les latitudes.

Latitude.	Temp. moyenne à l'ouest de l'ancien continent.	Temp. moyenne à l'est du nouveau continent.	Différence.
30°	21°,4	19°,4	2°,0
40	17 ,3	12 ,5	4 ,8
50	10 ,5	3 ,3	7 ,2
60	4 ,0	—4 ,6	9 ,4

Dans les deux mondes, la zone dans laquelle le décroissement de la température moyenne est le plus rapide, se trouve comprise entre les parallèles de 40° et de 50°. C'est ce qui fait que nulle part les produits de la végétation et ceux de l'agriculture ne sont plus variés (M. de Humblodt).

729. D'après la définition des températures moyennes, on conçoit qu'une égale quantité de chaleur annuelle puisse être, dans divers lieux, très inégalement répartie entre les différentes saisons. Le tableau suivant montre combien les hivers et les étés diffèrent entre eux sur toutes les lignes isothermes, depuis les 28° et 30° degrés de latitude nord jusqu'aux parallèles de 55° et de 60°. On remarquera que dans les deux bandes de l'ancien et du nouveau monde, formant deux systèmes de climats différens, le partage de la chaleur annuelle entre l'hiver et l'été se fait de manière que, sur la ligne isotherme de 0°, la différence 26° des deux saisons est presque double de 13°,5 qu'on observe sur la ligne isotherme de 20°.

	BANDE CISATLANTIQUE. (Long. 3° Occ. et 15° Or.)			BANDE TRANSATLANTIQUE. (Long. 60° Occ. et 74° Or.)		
	TEMPÉRATURE moyenne (1)		Différence.	TEMPÉRATURE moyenne		Différence.
	de l'hiver.	de l'été.		de l'hiver.	de l'été.	
Ligne isoth. de 20°	15°	27°	12°	12°	27°	15°
15	7	23	16	4	26	22
10	2	20	18	— 1	22	23
5	— 4	16	20	—10	19	29
0	—10	12	22	—17	13	30

Pour les températures moyennes du mois le plus chaud et du mois le plus froid, les différences seraient dans le même sens, et plus considérables encore.

730. Les causes qui influent sur la température moyenne annuelle d'une contrée, sont de deux espèces : les unes élèvent, les autres abaissent la température. Parmi les premières on peut citer la proximité d'une côte occidentale dans la zone tempérée, des mers intérieures ; la prépondérance des vents du sud et de l'ouest dans l'extrémité occidentale, la rareté des marais et le déboisement d'un sol sablonneux. Parmi les secondes, l'élévation au-dessus du niveau de l'océan, l'absence de plateaux étendus, un continent se prolongeant jusqu'aux glaces polaires sans interposition de mer libre ; une mer équatoriale, des chaînes de montagnes qui empêchent l'accès de vents chauds, de vastes forêts. (*Fragm. géolog.*, t. 2, p. 442.)

(1) On compte ici l'hiver du 1er décembre au 1er mars, et l'été du 1er juin au 1er septembre.

731. *Table des températures extrêmes observées à Paris, et dans d'autres lieux du globe.*

Paris.	Maximum du froid.
1665	5 février. . . — 21°,2
1709	13 janvier. . . — 23 ,1
1776	29 janvier. . . — 19 ,1
1783	30 décembre. . — 19 ,1
1795	25 janvier. . . — 23 ,5
1820	11 janvier. . . — 14 ,3
1823	14 janvier. . . — 14 ,6

Paris.	Maximum de la chaleur.
1706	8 août. . . . + 35°,3
1793	8 juillet. . . . + 38,4
1800	18 août. . . . + 35,3
1808	15 juillet. . . . + 36,2

La température moyenne de Paris est de 10°, 67.

Ces observations ont été faites avec des thermomètres placés au nord, à l'ombre, et, autant que possible, à l'abri des réverbérations du soleil. Les instrumens couverts de noir de fumée et exposés à l'action directe du soleil, auraient marqué 8 à 10 degrés de plus.

Ce n'est pas là le maximum des températures des corps placés à la surface de la terre. Le sable, la terre végétale noire peuvent marquer jusqu'à 65 et 70 degrés.

On aurait des résultats plus exacts en agitant le thermomètre vivement dans l'air.

732. *Résultats observées par le capitaine Parry, en* 1819.

Milieu du détroit de Davis et de la baie de Baffin.

	Maximum.	Minimum.	Moyenne.
Juillet	+ 7°,7	— 3°3	+ 0°,9
Ile Melville.		Lat. nord, 74°3/4, Long. ouest, 113°	
Décembre	— 14°,4	— 42°,8	— 29°,9
Février	— 27°,2	— 45°,6	— 35°,6
Août	+ 17,2	— 5°,5	+ 5°,8

La moyenne des températures de l'île Melville est de — 18°, ce qui équivaut à peu près au plus haut degré de froid de notre climat. Aussi le mercure y gelle-t-il naturellement à l'air libre, pendant cinq mois de l'année. (*Voyez* les notes scientifiqes de M. Arago, *Annuaire* 1825).

On voit donc que les températures extrêmes varient des régions polaires aux régions équatoriales de près de 100°.

(*Voyez* plus loin la température du pôle nord.)

733. *Températures des deux hémisphères.* On admet que l'hémisphère boréal, à parité de latitude, a une température moyenne un peu plus élevée que celle de l'hémisphère austral.

Les distances du soleil à la terre, aux solstices du cancer et du capricorne, sont dans le rapport des nombres 30 et 29. Le solstice du cancer correspond à l'été de l'hémisphère boréal et à l'hiver de l'hémisphère austral : c'est le contraire pour le solstice du capricorne. L'effet de cette différence dans les distances du soleil à la terre est donc de rendre l'été moins chaud et l'hiver moins froid dans l'hémisphère boréal que dans l'hémisphère austral; et, comme la chaleur de l'été est supérieure à la chaleur de l'hiver, l'hémisphère boréal devrait donc être plus froid que l'hémisphère austral. L'observation est contraire à cette conséquence : il faut donc chercher une autre cause. Or la durée des saisons n'est pas la même dans les deux hémisphères ; l'été boréal surpasse de huit jours l'été austral, et l'hiver boréal est plus court de huit jours que l'hiver austral. La chaleur de l'été est donc augmentée dans l'hémisphère boréal, et le froid de l'hiver diminué; ces deux causes se compensent à peu près.

734. *Températures du globe à diverses profondeurs.* La question des températures terrestres est fort composée; c'est à l'analyse seule qu'il appartient de la résoudre. Voici comment Fourrier considère ce sujet.

« La chaleur qui se distribue dans l'intérieur de la terre est assujétie à trois mouvemens distincts :

» 1° Les rayons du soleil pénètrent le globe et causent des variations diurnes et annuelles dans les températures. Ces changemens périodiques cessent d'être sensibles à quelque distance de la surface. Au delà d'une certaine profondeur, et jusqu'aux plus grandes distances accessibles, la température due à la seule influence du soleil est devenue fixe. Cette quantité immense de chaleur solaire, qui détermine les variations périodiques, oscille dans l'enveloppe extérieure de la terre; elle s'abaisse au-dessous de la surface pendant une partie de l'année, et, pendant la saison opposée, remonte et se dissipe dans l'espace.

» 2° La température des lieux profonds, constante pour un lieu donné, est variable pour les points différemment situés par rapport à l'équateur, de sorte que la chaleur solaire pénètre d'abord les zones équinoxiales, et se dissipe à travers les régions polaires.

» 3° Il ne suffit pas de considérer le foyer extérieur, il faut encore porter son attention sur le mouvement de la chaleur propre du globe. Si la température des lieux profonds, comme les expériences semblent l'annoncer, devient sensiblement plus grande à mesure qu'on s'éloigne de la surface, il est impossible d'attribuer cet accroissement à la chaleur du soleil. Il est dû entièrement à une chaleur primitive que la terre possédait à son origine, et qui diminue dans le cours des siècles en se dissipant à sa surface.

Cette hypothèse d'une chaleur intérieure et centrale s'est renouvelée dans tous les temps, car elle se présente d'elle-même à l'esprit comme la cause naturelle de plusieurs grands phénomènes.

Les observations de M. Gensanne dans les mines de Giro-Hagny, près de Béfort, de M. Daubuisson dans les mines de Freyberg, de M. de Humboldt dans ces dernières mines et dans les mines d'Amérique, etc., etc., montrent que l'accroissement est d'environ un degré par 30 à 40 mètres (1).

(1) L'accroissement de la température ne peut être mis en doute; mais la science ne possède pas encore des données précises en assez grand nombre. (*Voyez*, à ce sujet, le mémoire que M. Cordier a lu en 1827 à l'Académie.) Ce mémoire renferme des observations nouvelles, et une discussion des observations anciennes

Cet accroissement ne sera pas toujours le même; il diminue progressivement, mais il s'écoulera un grand nombre de siècles avant qu'il soit réduit à la moitié de sa valeur (1).

Plusieurs physiciens présentaient des objections aux expériences précédentes; ils attribuaient l'élévation de température à la présence des ouvriers, des lampes, etc. M. Arago, pour lever ces difficultés, a proposé de prendre la température de l'eau des puits artésiens. Voici quelques résultats obtenus dans les environs de Lille; à $22^m,6$ — 11°, 15 à $38^m,8$ 12, 12 à $100^m,5$ — 14°, 1. On creuse dans ce moment un puits à la plaine de Grenelle, près de Paris, qui fournira de nouvelles lumières sur ce sujet.

La température des lieux profonds (40 ou 50 mètres au-dessous de la surface) est constante pour un lieu déterminé, mais elle n'est pas la même dans les divers climats; elle décroît en général lorsqu'on s'avance vers les pôles.

Il résulte d'observations faites par M. Arago pendant quatre années, les données suivantes :

Profondeurs.	Variations.
$1^m,624$	13°,02
3, 248	7°,80
6, 497	2°,48
8, 121	1°,41

Les profondeurs sont relatives aux réservoirs. Les températures que nous rapportons n'ont pas encore été corrigées de l'effet de la tige. Le maximum de température a été observé vers le 18 décembre, et le minimum vers le 13 juin pour la plus grande profondeur; et vers le 15 novembre, et le 10 mai pour la plus petite.

Les variations qui ont lieu à la surface de la terre se font donc sentir dans l'intérieur d'autant plus tard que la profondeur est plus grande; et pour une profondeur donnée la variation diurne ou annuelle est d'autant plus grande que celle de la surface est plus considérable. Ainsi, sous l'équateur où les températures extrêmes sont peu différentes, la variation à 1/2 de mètre de profondeur n'est à l'ombre que 0, 1 à 0,2 de degré (M. Boussingault), tandis qu'en Europe, où à cette profondeur la variation serait de plusieurs degrés en quelques jours, il faut s'enfoncer à une assez grande distance de la surface pour trouver la couche à température constante. Dans les caves de l'Observatoire (à 28^m environ), la température 11°,7 n'a pas varié de plus de 0°,2 de 1817 à 1835. Encore il n'est pas certain que le déplacement du zéro n'est pas pour quelque chose dans cette variation.

On s'exposerait à commettre de graves erreurs en prenant la température des sources pour la température moyenne de l'année parce que ces sources peuvent être alimentées par les pluies, la fonte de neiges, etc. (1).

735. *Froid des lieux élevés.* La température de l'air décroît à mesure qu'on s'élève dans l'atmosphère. D'après des observations de M. de Humboldt en Amérique, de Saussure et de M. Ramond dans les Alpes, de M. Gay-Lussac dans son ascension aérostatique, une élévation de 190 mètres correspond à un degré d'abaissement pour l'été. Le décroissement varie beaucoup avec la température absolue de la surface. Si cette température est 0, la hauteur correspondant à 1° de variation est supérieure à 180°; et près des pôles le décroissement est peu sensible, puisque le capitaine Parry a trouvé à 133 mètres la même température — 31° que sur les glaces du sol. Nous nous permettrons de remarquer qu'il aurait été utile de faire l'expérience à une plus grande hauteur.

Ce décroissement de température dépend de plusieurs causes : d'un rayonnement plus libre vers les espaces planétaires à travers des couches d'air plus rares, de l'extinction progressive des rayons de chaleur envoyés par la terre; une plus grande capacité dans l'air et une plus facile évaporation jouent nécessairement un rôle. D'une autre part, la chaleur solaire arrive sur le sommet des montagnes plus intense qu'à la surface de la terre, puisqu'elle a traversé une couche atmosphérique moindre : l'influence de chacune de ces causes n'est pas bien connue.

Températures à différentes hauteurs.

Hauteur.	Zone équatoriale de 0 à 10° latitude boréale et australe.	Zone tempérée de 45° à 47° latitude.
0 mètres.	+ 27°,5	+ 12°,0
974	+ 21 ,8	+ 5 ,0
1949	+ 18 ,4	— 0 ,0
2923	+ 14 ,3	— 4 ,8
3900	+ 7 ,0	»
4872	+ 1 ,5	»

Meaux (Tarn) a fourni un degré d'accroissement pour 28 mètres de profondeur; Lettry (Calvados), le même accroissement pour 23^m; enfin à Decise (Nièvre), un degré correspond à 15 mètres. M. Cordier conclut de là que la valeur de l'accroissement des températures, à mesure qu'on pénètre plus avant dans la terre, n'est pas la même dans tous les points d'un même pays, et que la variation n'est pas en rapport avec la latitude. M. Cordier reproduit l'hypothèse d'un feu central, et pense que la majeure partie du globe est en liquéfaction. (*Voyez* les mémoires du Muséum.) (*Théorie de la Chaleur*, p. 438.) On peut expliquer, suivant M. Poisson, l'accroissement de température avec la profondeur, sans avoir recours à l'hypothèse d'un feu central. Dans les environs de Genève la température augmente d'un degré par 26^m.

(1) Ainsi le refroidissement de la terre est à peu près à sa limite. *Voyez* un mémoire de Fourrier, pour une discussion de la question des températures terrestres. (*Ann. de Chim. et de Phys.*, t. 14.) Voyez même journal pour un mémoire de Laplace.

(1) Les sources les plus chaudes connues en Europe sont celles de Chaudes-Aigues en Auvergne; celle de

Ces températures ont été déduites par M. de Humboldt d'un grand nombre d'observations. (*Voyez* le mémoire de M. de Humboldt, *Ann. de Chim.*, *et de Ph.*, t. 14, p. 5.)

Presque toutes les températures prises jusqu'à présent sont relatives à des montagnes, en sorte qu'elles ne sont pas exactement les mêmes qu'on observerait dans une même verticale, dans un ballon par exemple.

736. *Neiges perpétuelles.* Il est peu de phénomènes relatifs à la distribution de la chaleur sur le globe, qui soient plus compliqués ou, en d'autres termes, plus dépendans de la localité que le phénomène des neiges perpétuelles.

La courbe des neiges perpétuelles n'est pas une bande isotherme; elle n'indique ni le terme de la congélation, comme on l'a admis long-temps, ni une couche d'air d'égale température moyenne. Cette température moyenne de l'air est au Chimborazo, + 1°, 5; au Saint-Gothard — 3°,7; dans la zone glaciale — 6°. La limite des neiges suit moins la trace des lignes isothermes de la plaine que les inflexions des lignes isothères (lignes d'égal été) (1). Elle dépend du partage de la chaleur annuelle entre les différentes saisons, de la longueur et de la température plus ou moins élevée des étés, du nombre des mois où la température est au-dessus de 4 à 5 degrés de la diaphanéité de l'atmosphère.

La limite des neiges perpétuelles descend beaucoup plus sur la pente méridionale de l'Himalaya que sur la pente septentrionale, ce qui est dû à la forte chaleur des étés de l'Asie et au rayonnement d'un plateau immense auquel ces montagnes sont adossées. Il existe nécessairement d'autres faits analogues, et même la hauteur inférieure de neiges doit être rarement la même sur les pentes opposées d'une même montagne.

En Asie, la chaleur des étés augmente l'élévation de la couche des neiges perpétuelles jusque dans la chaîne du Caucase.

La limite inférieure des neiges, c'est-à-dire la courbe qui passe par la plus grande hauteur à laquelle les neiges se conservent pendant le cours d'une année, atteint en différentes saisons, dans chaque zone, un maximum d'élévation. La quantité de cette variation est l'oscillation annuelle de la limite inférieure des neiges. Sous l'équateur, l'oscillation de cette limite ne s'étend pas à plus de 30 mètres. A l'extrémité boréale de la zone torride, sous le 19° de latitude, elle atteint 750 mètres. A mesure qu'on s'éloigne de l'équateur, le phénomène de l'oscillation annuelle des neiges devient moins régulier. La limite des neiges la plus élevée a été observée par la latitude australe (16° à 17° 3/4).

Brousse, au pied du mont Olympe. La première marque 80°,25, la seconde 84. Le Geysers d'Islande, et les sources analogues, qui ne vont que par intervalles, et qui vomissent de l'eau bouillante mêlée de sable, de pierres, etc., sont en communication avec des volcans en activité.

M. de Humboldt et M. Boussingault pensent que la source de Las-Trincheras (Venezuela) dont la température est environ de 93°, n'a aucune connexion avec un volcan en activité.

La température élevée des eaux sulfureuses peut s'expliquer par la décomposition des sulfures, etc. Pour celle des eaux limpides, dépourvues de soufre, de fer, etc., on en a cherché la cause dans la haute température de l'intérieur du globe. Quant aux sources d'eau froide à 1, 2 et 3 degrés, la formation en est attribuée à la fonte des neiges.

(1) Les lignes isothères s'écartent bien plus des parallèles géographiques que les lignes isothermes. Par exemple, la température de l'été à Moscou est à peu près la même que celle de l'été à l'embouchure de la Loire, quoiqu'il y ait entre les deux lieux une différence de 11° en latitude.

Tableau de la limite inférieure des neiges.

	Latitude.	Température moyenne à cette hauteur.	Hauteur.
	0	+ 1°,5	4791m. M. de Humboldt.
	14 à 19°		
Cordilière orient., Haut-Pérou.	. . . . .	. . . . .	5200
Cordilière occid., *Id.*	. . . . .	. . . . .	5130 M. Pentland.
	19 à 20°	. . . . .	4580 M. de Humboldt.
	27 à 36		
Hymâlaya, (pente mér.)	. . . . .	. . . . .	3850 M. Webb.
Idem, pente sept.	. . . . .	. . . . .	5000
Caucase,	42° à 43°	. . . . .	3216 MM. Engelhart et Parrot.
Pyrénées,	42°1/2 à 43°	— 3°,5	2729 M. Ramond.
Alpes,	45°1/2 à 46° 1/2	— 4°,0	2550 M. Saussure. 1670 M. Walhemberg. 2660 M. de Humboldt.
Carparthes,	49° 1/2.	. . . . .	
Laponie,	62° 65°	— 6°,0	1750 950 M. de Buch.

Voyez le mémoire de M. de Humboldt cité plus haut. Voyez aussi les *Fragmens géologiques*.

Quelle est la température des espaces planétaires? C'est une question qu'il n'est pas facile de décider rigoureusement. Fourrier l'avait fixée entre 50 à 60 degrés, le premier nombre était le plus grand froid des pôles. M. Saigey, en discutant toutes les observations, est arrivé à — 62° pour cette température. La plupart des physiciens admettent une température peu différente de — 60°, cependant nous devons dire que M. Poisson a été conduit à — 13°.

737. *Sur la température moyenne du pôle nord.* Il n'est pas d'observation directe propre à faire connaître la température du pôle, puisque les navigateurs ne se sont avancés que jusqu'au 82e degré de latitude. Néanmoins peut-être est-il permis de conclure, avec une certaine approximation, la température moyenne du pôle.

Si l'on suppose que le nouveau monde se prolonge jusqu'au pôle nord, soit d'une manière continue, soit par un archipel formé d'îles fort rapprochées, il faudra employer le petit tableau suivant, qui a été formé d'après les expériences faites sur le méridien américain.

738. *Température des mers.* La mer occupe une portion considérable de la surface du globe, puisqu'elle en fait près des trois quarts.

Des calculs approximatifs indiquent que, dans l'hémisphère septentrional, la terre est à la mer comme 419 à 1000, et dans l'hémisphère méridional, dans le rapport de 129 à 1000. Presque toute cette étendue d'eau est réunie en une seule masse, qu'on nomme Océan, et dont la plus grande partie se trouve dans l'hémisphère méridional.

La présence de l'eau à la surface de la terre a pour effet de rendre la distribution de la chaleur plus uniforme; dans l'Océan et dans les lacs, les molécules les plus denses se dirigent continuellement vers les régions inférieures, et les mouvemens de la chaleur dus à cette cause sont beaucoup plus rapides que ceux qui s'accomplissent dans les masses solides, en vertu de la faculté conductrice.

Une portion de la chaleur solaire qui arrive à la surface de l'eau pénètre dans son intérieur, et s'y change en chaleur obscure.

739. Il résulte des observations de M. de Humboldt que dans l'Océan atlantique, ainsi que dans le grand Océan, les eaux ne varient pas d'un degré de température sur une étendue de plusieurs milliers de lieues carrées, bien entendu à une grande distance des côtes.

Si le mouvement des eaux ne modifiait pas la température de l'Océan, l'accroissement de chaleur sous la zone torride serait énorme, parce que l'eau, comme tous les corps, réfléchit d'autant

du corps échauffé. Voici l'appareil employé par Saussure.

Cet appareil consiste en une pièce de bois, couverte d'une ou de plusieurs lames de verre bien transparent, placées à quelque distance les unes des autres. L'intérieur de la caisse est couvert de noir de fumée; l'air échauffé est contenu de toutes parts, soit dans l'intérieur de la caisse, soit dans chaque intervalle compris entre les deux lames; des thermomètres, placés dans la caisse et dans les intervalles, marquent le degré de chaleur acquis par chacune de ces capacités. Cet appareil a été exposé au soleil vers l'heure de midi, et l'on a vu le thermomètre placé dans le fond de la caisse monter jusqu'à 140 degrés. Les thermomètres placés dans les intervalles ont acquis des températures d'autant moindres qu'ils étaient plus éloignés du fond.

La théorie de cet appareil est fort simple. D'une part la chaleur acquise se concentre, parce qu'elle n'est pas immédiatement dissipée par le renouvellement de l'air; de l'autre la chaleur émanée du soleil traverse le verre avec facilité (n° 97), et se change dans l'appareil en chaleur obscure qui ne jouit plus sensiblement de cette propriété.

Cette expérience met en évidence l'influence de la présence de l'atmosphère sur l'état thermométrique du globe, et justifie l'usage des doubles croisées pour augmenter la chaleur des appartemens.

M. Pouillet estime que la quantité de chaleur versée par le soleil annuellement sur la terre, est capable de fondre une couche de glace de 14 mètres qui recouvrirait toute la surface du globe.

748. *De la percussion.* Une barre de métal, soumise à quelques coups de marteaux, s'échauffe au point de déterminer l'inflammation du phosphore.

L'usage du briquet pneumatique est fondé sur la propriété qu'a l'air de dégager, par une compression subite, assez de chaleur pour enflammer l'amadou.

Il résulte des expériences de Montgolfier qu'une pièce de canon, ancienne ou nouvelle, s'échauffe beaucoup plus par une décharge qu'elle ne le ferait si on la remplissait de charbons incandescens, et qu'on les y laissât pendant un temps dix fois plus long que celui de la décharge.

Le fait du dégagement de la chaleur dans le choc des corps, et particulièrement dans la dernière expérience, paraît plus favorable à l'hypothèse qui regarde la chaleur comme étant le résultat des vibrations de l'éther ou des molécules des corps, qu'à celle qui la considère comme une matière.

Du frottement. Le frottement produit des effets analogues à ceux que produit la percussion ou le choc.

Une lame d'acier, par son frottement sur une planche couverte de sable, donne assez de chaleur pour ne pouvoir plus être touchée impunément. Le frottement rapide des roues contre les essieux détermine souvent leur inflammation mutuelle. Les sauvages se procurent du feu en frottant avec force, l'un contre l'autre, deux morceaux de bois sec. Dans le briquet ordinaire, le frottement d'une pierre dure (silex) détache de l'acier des parcelles de fer qui s'embrasent dans l'air; ces parcelles d'oxide, reçues incandescentes sur l'amadou, la poudre, etc., enflamment ces matières.

Voici une expérience importante du comte de Rumfort sur la chaleur produite par le frottement. Ce physicien a fait mouvoir avec rapidité un foret obtus dans un cylindre de bronze du poids de 13 livres, et il a observé que le foret avait dans l'espace de deux heures, par une pression équivalente à cent quintaux, réduit en poudre 41 15 grains de bronze, et qu'il s'était dégagé une quantité de chaleur capable d'amener 26,38 livres d'eau de la température de la congélation à celle de l'ébullition. La chaleur spécifique de la poudre détachée était la même que celle du bronze qui n'avait pas subi de frottement. L'explication de cette expérience ne paraît pas facile dans la théorie du calorique. (*Mém. sur la Chal.*, p. 29.)

Par le frottement mutuel de deux morceaux de glace, Hump. Davy est parvenu à en fondre une quantité considérable. La conclusion de cette expérience est la même que celle de la précédente.

749. Le changement d'état n°s 179 et 183; la combinaison des électricités n° 289; les combinaisons chimiques donnent en général naissance à un grand dégagement de chaleur.

On a cru rendre compte du dégagement de chaleur par le rapprochement des molécules; mais cette explication ne convient pas à tous les cas. Par exemple dans la combustion du charbon par l'oxigène, le volume d'acide carbonique est le même que celui du gaz employé. Le carbone de l'état solide est passé à l'état gazeux. On a pensé que la capacité de l'acide carbonique était moindre que celle de ses élémens; mais la différence est très faible et ne peut expliquer le grand développement de chaleur. Il résulte d'ailleurs d'expériences de MM. Dulong et Petit que la perte de chaleur qui s'opère au moment d'une combinaison, n'est suivie dans un grand nombre de cas d'aucune diminution dans la capacité. En voilà assez pour montrer que la théorie de la combustion n'est pas faite. Nous citerons quelques résultats tirés de nos expériences.

1^k^ de charbon dégage en brûlant 7914° de chaleur.

1^k^ d'hydrogène, 23640°.

Le phosphore, les métaux (le fer, le zinc, l'étain), les 5/3 du charbon.

Un corps qui, comme le charbon, ne change pas le volume du gaz oxigène, développe la

même quantité de chaleur, quelle que soit la pression.

Les expériences suivantes se trouvent naturellement placées ici.

Tous les corps solides exercent une certaine action sur l'eau et sur les autres liquides.

Leslie a reconnu que, lorsqu'on mouille le linge dont est entourée la boule d'un thermomètre, la température de cet instrument s'élève d'une manière sensible.

M. Pouillet vient de faire un grand nombre d'expériences, desquelles il résulte que, toutes les fois qu'on verse un liquide sur un corps solide quelconque, réduit en poudre ou en petits fragmens, la température du mélange s'élève d'une quantité notable.

Le verre, les métaux, les oxides mouillés par l'eau, par l'alcool, par l'acide nitrique et par l'huile, dégagent en général 0°, 25.

Les substances organiques, dont la pulvérisation est beaucoup plus complète, dégagent de 1 à 10° de chaleur.

Dans ces diverses expériences, le dégagement de chaleur est toujours très faible, comparativement à celle qui se manifeste dans les combinaisons chimiques, parce que l'action du liquide ne s'exerce que sur un petit nombre de points, et parce que, d'une autre part, les combinaisons formées sont très peu stables.

750. *Sources de la chaleur animale.* Lavoisier et Laplace ont comparé la chaleur qu'abandonne un animal à sang chaud, dans un temps donné, à la chaleur dégagée par la formation de l'eau et de l'acide carbonique, dans la respiration du même animal. Les expériences de ces savans célèbres n'ayant pas paru à l'Académie faites avec toute la rigueur désirable, elle a proposé la même question pour prix en 1823. J'ai été assez heureux pour le remporter. Voici la disposition de l'expérience.

L'animal est placé dans une boîte en cuivre, assez grande pour qu'il n'y soit point gêné; cette boîte a un rebord dans lequel plonge le couvercle; l'intervalle entre la boîte et le couvercle est rempli de mercure; la petite boîte renfermant l'animal est fixée dans une caisse en cuivre; on connaît exactement le poids de tout le cuivre employé et de l'eau pure qui enveloppe la boîte dans laquelle est l'animal. Tout cet appareil est placé sur des supports en bois très sec; l'animal est, d'ailleurs, séparé du cuivre par des baguettes d'osier, afin qu'il ne lui cède pas de sa chaleur propre. L'air est fourni par un gazomètre exactement gradué; ce fluide passe d'abord dans la boîte, pendant assez de temps pour qu'il s'y trouve, au moment où l'on prend la température de l'eau, dans le même état qu'à la fin de l'expérience : la température de l'eau est connue avec une grande précision. Pendant toute la durée de l'expérience, qui est ordinairement de deux heures, l'air arrive dans la boîte où se trouve l'animal, et en sort avec une vitesse constante. Le gaz qui a été respiré contient ordinairement six pour cent d'acide carbonique; on en détermine la quantité en traitant l'air par la potasse : ce fluide, dépouillé de son acide carbonique, est ensuite analysé par le gaz hydrogène.

L'appareil est tellement combiné que le gaz respiré est reçu immédiatement sur le mercure. On n'a pas ainsi à craindre la dissolution de l'acide carbonique par l'eau. La description suivante en donnera une idée.

Tout appareil propre à la mesure de la chaleur animale doit être composé de trois parties principales : d'un gazomètre fournissant l'air à l'animal, d'une boîte renfermant l'animal, enfin d'un second gazomètre recevant le gaz respiré. Ces trois parties sont indiquées dans la *fig.* 482 *bis* par les lettres *A*, *B* et *C*.

A est le réservoir d'air : c'est un gazomètre gradué avec soin; par les tubes latéraux *H* et *F* on connaît le volume du gaz; un thermomètre *s* donne la température de ce gaz, et un manomètre *I* l'élasticité; un entonnoir *k*, placé au-dessus du gazomètre, est entretenu constamment plein d'eau par sa communication avec un cuvier *L*, qui lui-même reçoit son eau d'un grand cylindre *p*. Au moment où l'on veut faire sortir l'air, on ouvre le robinet de l'entonnoir *k*; l'eau tombe et chasse le gaz par le tube *R* : la vitesse du gaz est constante pendant tout l'écoulement; on peut la reproduire la même dans toutes les expériences, par le moyen d'un arc de cercle divisé, qui permet d'ouvrir toujours le robinet de la même quantité.

Le thermomètre *q* donne la température de l'air à l'entrée dans la boîte; le thermomètre *t* la donne à la sortie; l'air, après la respiration, est reçu dans le gazomètre *C*, qui consiste en un grand cylindre en fonte, d'un pied environ de diamètre, dans l'intérieur duquel est fixé un cylindre en bois de huit pouces de diamètre : l'intervalle compris entre le bois et la fonte est rempli de mercure; le cylindre est recouvert du même métal. Le cylindre en bois est enveloppé par un cylindre creux en cuivre, mobile, qu'on a soin de couvrir d'un vernis; ce dernier plonge d'abord dans le mercure; mais, à mesure que le gaz respiré arrive dans son intérieur, il est soulevé par un contre-poids *w*; ce contre-poids est un seau vide qui se remplit peu à peu par le moyen d'un second seau *u* plein d'eau, avec lequel il communique par un siphon étroit.

Par les règles *F* et *D*, divisées en parties égales, on connaît exactement le volume du gaz. La flexibilité du tuyau en plomb *t o* permet au cylindre en cuivre de monter sans qu'aucune partie de l'appareil soit dérangée.

α, *β* et *γ* représentent les supports en bois destinés à soutenir le tuyau en plomb, à mesure que le cylindre en cuivre sort du réservoir.

Par le manomètre *J* on juge si la pression intérieure est la même que la pression extérieure. Quand tout l'air du réservoir *A* est chassé, on me-

sure exactement le volume du gaz respiré, dont on connaît la température par un thermomètre *a* : on ferme tous les robinets, et, par une pression plus ou moins forte, exercée sur le cylindre en cuivre, on fait sortir le gaz par le tube *l* : on le reçoit sur le mercure dans une capsule de porcelaine : on l'analyse comme il vient d'être indiqué.

Je rapporterai deux expériences tirées de mon mémoire, et qui sont propres à donner une idée du phénomène.

1re *Expérience.*

Lapine âgée de plusieurs années.
Durée de l'expérience, 1 heure 36 minutes.
Après l'expérience,

Volume d'air fourni à 8°,27 = { 10l,079 oxig. / 37,914 azote. }
47l,993

47,842. . . { 3,076 acide carbonique. / 6,023 oxigène. / 38,743 azote. }

Acide formé. . . . . 3lit.,076.
Azote dégagé. . . . . 0 ,829.
Oxigène disparu. . . . 0 ,980.
Oxigène disparu = 1/3 de l'acide formé.
= 1/4 de l'oxigène total consommé.
Azote dégagé = 4/5 de l'oxigène disparu.
= 8/31 de l'acide formé.

Calcul de cette expérience.

La caisse en cuivre qui contient l'eau, celle qui renferme l'animal, réunis à l'eau, forment une masse équivalente à 25387,5 grammes de ce liquide.

L'élévation de la température de 25387s,5 d'eau est de 0°,703; 25387 × 0°,703 est donc la quantité totale de chaleur émise par l'animal pendant l'expérience. On la représente par 100. L'acide carbonique formé pendant le même temps a dégagé une certaine quantité de chaleur qu'on peut trouver, puisque un gramme de carbone, en se transformant en acide carbonique, dégage une quantité de chaleur capable d'élever 7914s,2 d'eau d'un degré. La composition de l'acide carbonique étant connue, on a le carbone qui y entre, et conséquemment la chaleur dégagée par la combustion de ce carbone au sein des poumons. En faisant ces calculs, qui sont très faciles, on trouverait que cette quantité de chaleur est les 682/1000 de la chaleur totale, émise par l'animal.

Il a disparu 0lit, 980 d'oxigène. Cet oxigène a formé de l'eau. La composition de ce liquide étant connue, on a l'hydrogène brûlé, et, comme on sait qu'une partie d'hydrogène en poids développe en brûlant 23640°,0 de chaleur, on peut calculer la chaleur produite par la formation de l'eau dans les poumons. Cette chaleur fait les 212/1000 de la chaleur totale. On a donc :

Chaleur animale. 100
Chaleur due à la formation de l'acide carbonique. . . . . 68,8 } 89,4
Chaleur due à la formation de l'eau 21,2 }
On calcule de la même manière les autres expériences.

2e *Expérience.*

Six petits lapins de quinze jours.
Durée de l'expérience, 2 heures 5 minutes.

Volume d'air fourni à 9°,25 = { 10,289 oxigène. / 39,086 azote. }
49l,475

A la fin, 48lit,980 = { 2,955 acide carbonique. / 6,219 oxigène. / 39,517 azote. }

Acide formé. . . . 2l,955,
Oxigène disparu. . . 1,218,
Azote dégagé. . . . 0,431,
Oxigène disparu = 12/20 de l'acide formé,
= 12/41 de l'oxigène total consommé,
Azote dégagé = 1/3 de l'oxigène disparu,
= 2/15 de l'acide formé.

La masse d'eau dans cette expérience était de 20822,8 grammes, l'élévation de la température a été de 0°,998, d'où Chaleur animale. 100
Chaleur due à la formation de l'acide carbonique. . . . . 58,5 } 82,1.
Chaleur due à la formation de l'eau. 23,6 }

Plus de deux cents expériences analogues ont été faites à des époques différentes (août et septembre 1822; septembre et octobre 1823; janvier, février et mars 1824) sur des canards adultes, sur des canards jeunes, sur des poules, des coqs, des poulets, des pigeons adultes, des pies, des chouettes, des chiens et des chats vieux, des chiens et des chats jeunes. Les résultats qu'elles ont fournis ont été sensiblement d'accord avec les précédens.

Dans aucune expérience, la chaleur de la respiration n'a produit moins de 7/10 ni plus de 9/10 de la chaleur totale émise par l'animal; le rapport 7/10 n'a même été donné que par de très jeunes animaux, qui perdent quelquefois une portion de leur chaleur propre.

On peut admettre maintenant comme résultats d'expérience :

1° Que la respiration est la principale cause du développement de la chaleur animale, que l'assimilation, le mouvement du sang, le frottement des différentes parties, ou le système nerveux, peuvent produire la petite portion restante;

2° Qu'outre l'oxigène employé à la formation de l'acide carbonique, une autre portion de ce gaz, quelquefois très considérable relativement à la première, disparaît aussi; qu'il disparaît en général plus d'oxigène dans la respiration des jeunes animaux que dans la respiration des animaux adultes;

3° Qu'il y a exhalation d'azote dans la respiration des mammifères carnivores ou frugivores, et dans la respiration des oiseaux; que la quantité d'azote exhalée est plus grande chez les frugivores que chez les carnivores;

4° Que, dans le développement de la chaleur animale, la respiration produit chez les carnivores une portion moins considérable de la chaleur animale totale que chez les frugivores, et qu'il en est de même des oiseaux, comparés aux mammifères.

Nota. J'ai constaté depuis l'approbation donnée à mon travail par l'Académie, que dans la respiration des grenouilles il y a dégagement d'azote.

(D'après les expériences présentées par M. Dulong à l'Académie, peu de temps avant d'être reçu membre de cette illustre société, et peu de temps avant la clôture du concours, la respiration produirait une portion moindre de la chaleur totale. Cette différence tient à ce que ce savant a pris pour calculer ses expériences les nombres fournis par Lavoisier et Laplace sur la combustion du carbone et de l'hydrogène. La différence la plus notable entre mon appareil et celui de M. Dulong consiste en ce que, dans ce dernier, le gaz était reçu dans un gazomètre plein d'eau, où il était défendu de l'action dissolvante du liquide par un flotteur, tandis que dans le mien le gaz était reçu immédiatement sur le mercure.)

C'est donc dans la respiration que l'homme et les animaux puisent la plus grande partie de la chaleur qui maintient leur température supérieure à celle des corps environnans, et qui leur permet de vivre dans une atmosphère dont la température est celle de la congélation du mercure, c'est-à-dire 39° au-dessous de zéro. Les habitans des régions boréales se trouvent une partie de l'année exposés à un pareil froid. Ainsi l'homme et les animaux à sang chaud peuvent supporter souvent sans danger le contact de l'air quand celui-ci a une température qui diffère en moins de près de 80° de la leur. Ils possèdent en eux la faculté d'augmenter la chaleur qu'ils développent dans un temps donné; mais ils ne possèdent pas à un aussi grand degré celle de la diminuer. On a vu souvent sous l'équateur des hommes mourir subitement quand la température s'élevait à 40°. Cependant des exemples prouvent que nous pouvons résister à des températures assez élevées.

MM. Banks, Blagden et Fordyce, s'étant exposés à une chaleur de près de 125°, ont conservé sensiblement la même température. MM. Berger et Delaroche, s'étant placés dans une étuve à 49°, n'ont trouvé leur température augmentée que de 4° environ. M. Laroche, étant resté seul 16 minutes dans une température de 90°, a vu la sienne s'accroître de 5°. C'est surtout dans la transpiration, qui devient dans ce cas très-abondante, qu'il faut chercher l'explication de ce fait.

Si la respiration est la cause principale de la chaleur animale, celle-ci devra s'affaiblir toutes les fois que la première sera affaiblie. C'est ce qui a été parfaitement constaté par les expériences de Legallois. Cet ingénieux physiologiste a vu qu'un animal se refroidit quand on lui fait respirer un air raréfié, et qu'on le place dans une position propre à gêner la respiration, etc. (*Ann. de Chim. et de Phys.*, t. 4.) (1).

(1) La respiration est, ou bien *aérienne*, lorsque l'animal respire l'air en nature, ou bien *aquatique*, lorsque l'animal respire dans l'eau, en soustrayant à celle-ci l'air qu'elle tient en dissolution.

Les animaux aériens respirent, soit au moyen des poumons, soit au moyen de trachées (on appelle *trachées* des vaisseaux élastiques qui reçoivent l'air par des stigmates percés sur les côtés de l'animal, et le distribuent en se ramifiant à l'infini dans tous les points du corps).

Les animaux aquatiques respirent par des branchies.

Les mammifères, les oiseaux et les reptiles respirent l'air en nature par des poumons. Il en est de même d'une partie des mollusques et de certains arachnides.

Les poissons, les batraciens dans leur jeune âge, la plus grande partie des mollusques et des annélides, enfin tous les crustacés respirent dans l'eau et au moyen des branchies.

Une partie des arachnides et les insectes respirent par des trachées.

NOTES.

PAGE 56.

Soient K et K' les dilatations apparentes d'une même substance renfermée dans une même enveloppe, aux températures t et t'.

D et D' les dilatations absolues de la même substance ;

d et d' les dilatations absolues de la matière de l'enveloppe,

on aura $K = D - d$. $K' = D' - d'$.

Si le rapport entre les dilatations absolues de la substance et de l'enveloppe était le même à toutes les températures, on aurait :

$D : D' :: d : d' ::$, d'où $D - d : D' - d' :: D : D'$.

Dans ce cas, les dilatations absolues étant proportionnelles aux dilatations apparentes, les températures indiquées par un thermomètre à enveloppe seraient les mêmes que celles de la substance ; ce qui est loin d'avoir lieu comme le montre le tableau suivant, tiré du mémoire de MM. Dulong et Petit, cité plus haut.

Thermomètre à air.	300°
Thermomètre à mercure. . . .	307,64
Mercure.	314,13

Comparaison du thermomètre à mercure avec le thermomètre à air. —

PAGE *ibid.*

On pourrait construire un thermomètre à air tout-à-fait semblable à celui qui sert pour la dilatation des gaz, et le plonger dans un bain d'huile en même temps qu'un thermomètre à mercure ; mais des thermomètres ainsi construits ne seraient sensibles qu'autant qu'ils auraient des dimensions très grandes. On évite l'emploi de pareils instrumens en déterminant les températures par le moyen ci-après décrit.

On a indiqué dans le texte comment on opère pour avoir les températures élevées sur le thermomètre à mercure.

Détermination des températures par le thermomètre à air. — Premier procédé.

On emploie à cet effet un tube ordinaire, du diamètre des tubes de baromètre, terminé par un tube court et d'un diamètre très petit (plongé dans le même bain que le tube précédent); ce dernier tube sort du bain dont on veut connaître la température ; la capacité de ce tube doit être négligeable, puisqu'elle ne participe pas à la chaleur du bain. Quand le thermomètre a acquis la température du bain (on chauffe ce dernier jusqu'au point où l'on veut comparer les deux instrumens ; on enlève le feu du foyer ; la température du bain s'élève encore, et, avant de descendre, reste un instant stationnaire) : on ferme au chalumeau l'extrémité du tube capillaire, et l'on note la hauteur du baromètre. On enlève le tube, et on le laisse refroidir dans une chambre dont la température est constante et bien connue. Quand le tube a pris la température de la chambre, on plonge l'extrémité effilée dans un verre contenant du mercure bien sec, on casse l'extrémité effilée, on note la hauteur du baromètre, la hauteur de la colonne de mercure entré dans le tube, on pèse le tube avec la colonne de mercure, on le pèse plein, on note la température de la chambre, et l'on a toutes les données nécessaires pour trouver la température indiquée par la dilatation de l'air.

Soit (*fig.* 93) $B\,C = h$ la hauteur du mercure dans le tube : soit P' le poids du mercure de cette colonne, soit P le poids du mercure qui remplit tout le tube à la température t; $P - P'$ sera le poids du mercure dont le volume égale celui de l'air froid; soient d la densité du mercure à la température t; T, la température élevée comptée sur le thermomètre à mercure, et déterminée par le moyen précédent; H' et H, les hauteurs du baromètre au moment où l'on ferme le tube, et où l'on prend le poids du mercure élevé dans le tube ; X, la température du thermomètre à air ; a, le coefficient de la dilatation des gaz.

K' le coefficient de la dilatation du verre entre zéro et t : K, le même coefficient entre zéro et la température T; ces températures sont comptées sur le thermomètre à mercure.

P étant le poids du mercure qui remplit le tube à la température t, $\frac{P}{d}$ sera le volume du mercure, et conséquemment la capacité du tube à la même température, cette capacité deviendra $\frac{P}{d}\,\frac{(1+KT)}{(1+K't)}$ à la température T. $\frac{P-P'}{d}$, est à la température t, et à la pression $H - h$; il devient $\frac{P-P'}{d} \times \frac{H-h}{H'}$ à la pression H' ; porté à la température *maximum* du bain, il devient $\frac{(P-P')}{d}\,\frac{(H-h)}{H'}\,\frac{(1+aX)}{1+at}$ 1 X étant la température marquée par le thermomètre à air. Ce volume remplit tout le tube.

On a donc :

$$\frac{(P-P')\,(H-h)\,(1+aX)}{(1+at)\,H'} = \frac{P\,(1+KT)}{1+K't}.$$

Si l'on remplit le tube d'hydrogène on obtient la même valeur pour X.

Donc les gaz se dilatent encore également aux températures élevées.

Deuxième procédé.

Le tube (*fig.* 506) plein d'air a une dispositon diffé-

rente de celle du tube dans le procédé précédent ; le tube très étroit qui lui est soudé se recourbe à angle droit et plonge dans une soucoupe pleine de mercure.

Quand le bain a acquis la température *maximum*, on porte sous l'extrémité inférieure du tube vertical une capsule pleine de mercure bien desséché. On note la hauteur du baromètre extérieur ; dès que l'appareil est complètement refroidi, on prend la hauteur du mercure dans le tube vertical, on note aussi la hauteur du baromètre. On peut donc calculer quelle aurait été la dilatation de l'air s'il avait conservé la même élasticité.

Pour faire ce calcul avec exactitude, il faut d'abord mesurer la dépression capillaire dans le tube vertical, afin de l'ajouter à la hauteur du mercure dans ce tube.

Il faut aussi déterminer d'avance le diamètre du tube vertical ; car l'air de la portion de ce tube qui se remplit de mercure, et dont la température est sensiblement constante, rentre en partie dans le large tube.

Le poids de l'air dilaté est égal à celui de l'air refroidi, puisque c'est la même quantité. En cherchant l'expression de l'air refroidi, et celle de l'air dilaté, on égale ces deux expressions, et l'inconnue, c'est-à-dire la température du thermomètre à air, se déduit de l'équation ainsi établie :

Soient H et H' les hauteurs du baromètre au moment où l'on plonge le tube dans le bain, et au moment où l'air est ramené à la température t ; T la température de l'air chaud, comptée sur le thermomètre à mercure ; t celle de l'air froid ; h la hauteur du mercure élevé dans le tube ; 1 le volume du tube $A\,B$; r celui du tube $A\,C$.

b la hauteur totale du tube vertical ; K le coefficient de la dilatation du verre dans l'intervalle des températures extrêmes de l'expérience, comptées sur le thermomètre à mercure. K' le même coefficient entre o et t.

Soient d la densité de l'air à la température t et à la pression H ; d' la densité du même fluide à la température T et à la même pression.

Le poids de l'air contenu à la température *maximum* T du bain sera représenté par $\left(\frac{1+KT}{1+K't}\right)d' + d\,r$. Voilà le poids de l'air dilaté ; cherchons celui de l'air froid.

Le volume de cet air est $\left(1 + r\frac{b-h}{b}\right)$ à la pression $H' - h$; il devient $\left(1 + r\frac{b-h}{b}\right)\frac{H'-h}{H}$ à la pression H ; le poids de ce volume sera $\left(1 + r\frac{b-h}{b}\right)\frac{H'-h}{H}d$; on a donc $\left(1 + r\frac{b-h}{b}\right)$

$$\left(\frac{H'-h}{H}d\right) = \left(\frac{1+KT}{1+K't}\right)d' + r\,d.$$

On en remplaçant $\frac{d'}{d}$ par son égal $\frac{1+at}{1+aX}$, X étant compté sur le thermomètre à air.

$$\left(\frac{1+KT}{1+K't}\right)\left(\frac{1+at}{1+aX}\right) = \left(1 + r\frac{b-h}{b}\right)\left(\frac{H'-h}{H}\right) - r.$$

Tout est connu dans cette équation, à l'exception de X ; on peut donc l'en déduire. MM. Dulong et Petit ont employé ce second moyen pour trouver les rapports entre les degrés du thermomètre à air et ceux du thermomètre à mercure ; ils ont obtenu les mêmes résultats que par le premier procédé. (*Journ. de l'École Polytech.*, t. 11, p. 200)

On pourrait, de la même manière, déterminer les températures supérieures à celle de la fusion du verre. Il suffirait d'employer une sphère de platine $A\,B$ (*fig.* 507), à laquelle serait adapté un tube $B\,H\,K$ en platine, qui serait terminé par un tube en verre $K\,E$. On placerait la sphère dans le foyer dont on voudrait connaître la température ; on porterait l'extrémité du tube E dans le mercure, et l'on connaîtrait la température par les formules précédentes avec une certaine approximation.

Sur la dilatation des liquides.

PAGE 53.

On a représenté la dilatation des liquides par la formule :

$$D = a\,t + b\,t^2 + c\,t^3.$$

On détermine les constantes a, b, c, pour trois températures différentes ; on introduit les valeurs numériques dans la formule, et les dilatations données pour les températures comprises entre celles qui ont servi à la détermination des constantes, sont assez d'accord avec l'expérience.

Sur le froid produit.

PAGE 85.

L'équation $F(x)\,d\,l = (P - F(x))\,(t - x)\,c$, établit une relation entre les différens éléments qui jouent un rôle dans cette expérience, et permet de calculer l'abaissement correspondant à une température donnée.

x est le degré de froid produit par l'expérience, l la chaleur latente de la vapeur d'eau ; la force élastique de la vapeur est une fonction de la température ; elle est ici représentée par $F(x)$.

d la densité de la vapeur rapportée à celle de l'air ; c sa capacité ; P la pression ; t la température de l'air.

Le premier membre est le froid produit par l'évaporation ; le second représente la chaleur fournie par le contact de l'air ; ces deux quantités sont sensiblement égales, pour de faibles degrés de froid. A l'invitation de M. Gay-Lussac, j'ai calculé les diverses valeurs de x, et j'ai trouvé des résultats peu éloignés des résultats de l'expérience.

On avait pris $d = 10/16$, $l = 550$; $c = 0,2669$; Et $F\,x = 0^m,76\,(10)^x\,0,0154547 - x^2\,0,0006658$.

Cette formule est d'autant plus exacte que le froid produit est plus faible. En effet, le froid calculé est à zéro de 5,85, ce qui ne diffère de 5,82, résultat de l'expérience, que de 0,03 ; tandis qu'à 15° la différence est dans le même sens de 0,33, et à 25 de 1°,03. Il en doit être ainsi, puisque la quantité négligée, le rayonnement des corps environnans, exerce une influence d'autant plus grande que le froid produit est plus considérable. (*Ann. de Chim. et de Phys.*, t. 21.)

Sur la mesure des hauteurs par le baromètre. —

PAGE 115.

$A\,H$ est la colonne atmosphérique (*fig.* 328).

$A\ B$ la surface de la terre.

La colonne atmosphérique $A\ H$ est divisée en parties égales.

$B\ D$ est la colonne de mercure qui fait équilibre au poids de l'air.

Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, sont les hauteurs au-dessus de la surface de la terre.

h_1, h_2, h_3, etc., les hauteurs du mercure dans le baromètre.

$Y_2 - Y_1$ est l'épaisseur d'une couche d'air assez peu étendue en hauteur pour qu'on puisse en supposer la densité constante.

$h_1 - h_2$, est l'abaissement du mercure correspondant à la différence $Y_2 - Y_1$. Si d est la densité de l'air comparée à celle du mercure, on aura $d = \frac{h. - h_2}{Y_2 - Y_1}$.

La densité d'un fluide élastique est proportionnelle à la pression qu'il supporte. Ainsi $d = \frac{h. - h_2}{Y_2 - Y_1} = C\,h$. C est une constante dont on déterminera la valeur.

On tire de cette équation $h_2 = h.\,(1 - C\,(Y_2 - Y_1)$; par suite $h_3 = h_2\,(1 - C\,(Y_3 - Y_2)$, $h_4 = h_3\,(1 - C\,(Y_4 - Y_3)$.

Comme on peut prendre l'épaisseur de chaque couche égale à D, ces équations donneront $h_2 = h\,(1 - CD)$, $h_3 = h_2\,(1 - C\,D)^2$ $h_4 = h^3\,(1 - C\,D)^3$, etc., et $Y_2 - Y_1 = D$, $Y_3 - Y_1 = 2\,D$, $Y_4 - Y_1 = 3\,D$, $Y_5 - y'. = 4\,D$, etc., d'où l'on voit que les hauteurs croissant en progression arithmétique, les densités de l'air décroissent en progression géométrique (p. 115).

Une hauteur quelconque donnera $Y^n - Y. = n\,D$. $h^n = h.)1 - C\,D)^n$, d'où $n = \frac{\log. h^n - \log. h.}{\log. (1 - C\,D)}$, d'où $Y_n - Y_1$ ou $X = -\frac{D\,(\log. h. - \log. h_n)}{\log. (1 - C\,D)}$.

En développant $\log. (1 - C\,D)$, et supposant D infiniment petit, il vient $X = \frac{m}{C}\,(\log. h. - \log. h_n)$.

Cette équation indique que X, ou la différence des deux stations, est proportionnelle à la différence des logarithmes des deux hauteurs du baromètre dans les deux stations. Il ne reste que la détermination de C : m est un nombre constant, c'est le module des logarithmes ordinaires : il est égal à 2,302585.

Dans le commencement de cette note on a supposé d ou la densité de l'air proportionnelle à la hauteur du baromètre; ainsi $d = C\,h$. Le coefficient C sera donc connu si la densité de l'air, rapportée au mercure, et si la hauteur du baromètre sont connues. MM. Biot et Arago ont trouvé à Paris $d = \frac{1}{10463}$ à zéro et sous la pression $0^m,76$, d'où $\frac{m}{C} = 18336^m$. La formule devient $X = 18336^n$. Log. $\frac{H}{h}$. (On remplace $h.$ et h_n par H et h.

Corrections. Latitude. Le coefficient C varie avec la latitude, la pesanteur croissant de l'équateur aux pôles (n° 21). Si elle est l'unité à la latitude de 45°, elle sera $1 - 0,00284$ cos. $2\,\Psi$ pour la latitude Ψ; mais la densité de l'air, pour une même hauteur $0^m,76$, est proportionnelle à la pesanteur. C croîtra donc dans le même rapport; il sera à la latitude Ψ, $C\,(1 - 0,00284$ cos. $2\,\Psi)$, et la formule générale deviendra $X = \frac{m}{C\,(1 - 0,00284 \text{ cos. } 2\,\Psi)} \log. \frac{H}{h}$, ou en développant et en se bornant aux deux premiers termes,

$$X = \frac{m}{C}\,(1 + 0,00284 \text{ cos. } 2\,\Psi) \log. \frac{H}{h}\Big).$$

Température. La densité $\frac{1}{10463}$ est à zéro tandis que la colonne X est à t. Ainsi (n° 102) il faut diminuer d dans le rapport de $1 + 0,00375\ t$ à 1, ou augmenter X dans le rapport inverse. Il faudra donc multiplier X par $1 + 0,00375\ t$.

Vapeur d'eau. Le rapport entre la densité de la vapeur et celle de l'air a été trouvé 10 à 16, n° 201. D'après cela, l'air humide doit être plus léger que l'air parfaitement sec. Si p est le poids de la colonne d'air sec, à la pression h, le poids de la même colonne d'air humide sera moindre dans un rapport que nous allons déterminer. Soit f la force élastique de la vapeur, celle de l'air sera $h - f$; le poids total sera

$p\left(\frac{h - f}{h}\right) + \frac{p\,f\,10}{h\ 16}$ ou $p\left(\frac{h - \frac{3}{8}f}{h}\right)$, d'où le rapport des poids devient : $\frac{1}{1 - \frac{3\,f}{8\,h}}$. C'est par ce nombre qu'il faut multiplier X, on aura donc :

$$X = 18339^m\,\frac{(1 + 0,00284 \text{ cos. } 2\,\Psi)}{1 - \frac{3\ f}{8\ h}} \log. \frac{H}{h}$$

$(1 + 0,00375\ t)$.

Les hauteurs h et H sont réduites à zéro. On sait faire ces réductions d'après le n° 271.

Remarquons qu'au lieu du coefficient $\frac{1 + 0,00375\ t}{1 - \frac{3}{8}\frac{f}{h}}$, on peut substituer $1 + \frac{2\,(T + t)}{1000}$, ce qui revient à remplacer 0,00375 par 0,00400 et à négliger $1 - \frac{3}{8}\frac{f}{h}$, il résulte de là $1 + 0,004\ t$ ou $1 + \frac{t}{250}$; mais la température n'est pas uniforme, elle décroît à mesure qu'on s'élève; et comme le décroissement suit à peu près une progression arithmétique, on prend la moyenne des températures de chaque station. On a donc :

$$1 + \frac{(T + t)}{2.\ 250} \text{ ou } 1 + \frac{2\,(T + t)}{1000}.$$

La formule est maintenant $X = 18336^{m} \left(1 + 0{,}00284 \cos. \Psi\right) \left(1 + \frac{2(T+t)}{1000}\right) \log. \frac{H}{h}$.

Il y a encore une correction; elle est relative au décroissement de la pesanteur dans la verticale.

M. de Laplace a donné la formule suivante (4e vol., *Mécan. cél.*) dans laquelle on tient compte de toutes les corrections.

$$X = 18336^{m} \left(1 + 0{,}00284 \cos. 2\Psi \left(1 + \frac{2(T+t)}{1000}\right)\right) \left[\left(1 + \frac{X}{r}\right) \log. \frac{H}{h} + \frac{X}{h} 0{,}86859\right]$$

r étant le rayon de la terre, on mettrait dans le second membre X déterminé sans avoir égard à r.

Le milieu du jour (midi) a été indiqué par M. Ramond, comme le moment le plus propre aux observations barométriques. Il faut éviter les temps où la température et la hauteur barométrique sont très variables, où l'agitation de l'air est considérable.

Il convient aussi de laisser le baromètre une journée dans la station où l'on doit prendre la hauteur, afin qu'il acquière la température de l'air.

Il faut isoler le baromètre autant que possible, ne pas le placer dans une gorge de montagnes, etc.

Les soins à prendre pour apporter de l'exactitude dans les observations barométriques sont très nombreux. On les trouvera indiqués avec beaucoup de détails dans les mémoires de M. Ramond, sur la formule barométrique.

Voyez en outre le mémoire de M. Oltmanns; le mémoire de M. Delcros, *Annales de Chimie et de Physique*, tome 8; un mémoire à M. Navier, même journal, tome 19.

Il faut encore beaucoup d'observations pour pouvoir estimer hors des tropiques les hauteurs avec les mesures barométriques.

FIN.

TABLE DES MATIÈRES.

Propriétés générales des corps. 11
Application à la pesanteur. 14
Du mouvement curviligne. 17
De la force centrifuge. *Ibid.*
Du pendule. 19
Application du pendule à la pesanteur. 20
Application du pendule aux horloges. 22
De l'équilibre produit par la composition de plusieurs forces, etc. *Ibid.*
De quelques machines simples. 24
Du levier. 25
Du plan incliné. 26
De la vis. *Ibid.*
De la poulie. *Ibid.*
Du treuil. 27
Des propriétés générales des fluides. *Ibid.*
De l'équilibre des liquides. *Ibid.*
Propriétés des gaz. 30
Mouvement des liquides. 31
Tuyaux de conduite. 33
Écoulement des liquides par des tubes très fins. *Ibid.*
Des pressions latérales exercées par les liquides en mouvement. *Ibid.*
Mouvement des gaz. 34
Gazomètres. *Ibid.*
Compressibilité des liquides. 35
Phénomènes capillaires. 36
Phénomènes dépendant de l'action moléculaire dans les corps solides. 39
De quelques instrumens communément employés. 43
De la vis. *Ibid.*
Du sphéromètre. *Ibid.*
Du comparateur. 44

DE LA CHALEUR.

Explication détaillé de la construction du thermomètre. 45
Thermomètre à air. 47
Du thermomètre différentiel. 48
Thermomètre à maximum et à minimum. *Ibid.*
Propriétés générales de la chaleur rayonnante. *Ibid.*
Des dilatations. 51
Dilatation des gaz. *Ibid.*
Dilatation absolue des liquides. 52
Dilatation apparente des liquides. 53
Dilatation des solides. 54
Pyromètres. 57
Pendules compensateurs. 58
Capacités des corps pour la chaleur. 60
Méthode des mélanges. 61
Méthode du refroidissement. 62
Chaleurs spécifiques des gaz. 63
Rapport entre la capacité des gaz sous un volume constant et la capacité sous une pression constante. 65
Dégagement de chaleur dans la compression des gaz. 66
Lois du refroidissement. *Ibid.*
De la réflexion et du rayonnement de la chaleur. 70
De la rosée. 75
Phénomènes dont la théorie est la même que celle de la rosée. 76
Propagation de la chaleur dans l'intérieur des corps. 77
Cas où la température est la même pour tous les points d'une même section. 78
De la conductibilité des fluides. 80
Changement d'état des corps. 81
Conversion des liquides en vapeurs. 82
Du froid par la fusion. 83
Du froid produit par l'évaporation. 84
Des vapeurs. 85
Forces élastiques. *Ibid.*
Densités des vapeurs. 89
Compression des Gaz. 92
Liquéfaction des gaz. 94
Mélange des gaz. 95
Mélange des gaz et des vapeurs. 96
De l'évaporation. 98

DE L'HYGROMÉTRIE.

Des densités. 104
Densités des gaz. 105
Des aérostats. 106
Densités des liquides. 106
Densités des corps solides. 107

Des aréomètres. 108
Du maximum de la densité de l'eau. 110
Perte de poids d'un corps dans l'air. 112

DE L'ATMOSPHÈRE.

Du décroissement de la densité de l'atmosphère. 115
Du baromètre. *Ibid.*
Des différentes espèces de baromètres. 116
Du baromètre à cuvette. *Ibid.*
Du baromètre à siphon. 117
Du baromètre à cadran. 118
De la machine pneumatique. 120
Des machines à compression. 122
Des pompes. 124
De la fontaine intermittente. 125
De la fontaine de Héron. 126
Du Siphon. *Ibid.*
Lampes hydrostatiques. 127

MACHINES A VAPEUR.

Machine de Newcommen et de Cawley. 128
Machine de Watt. 129
Machine de Woolf. 130
Machine à haute pression. *Ibid.*
Avantages comparatifs des diverses machines. 133
Calcul des effets dynamiques. 134
Bateaux à vapeur. 135
Voitures à vapeur. *Ibid.*
Armes à vapeur. *Ibid.*
Machines mues par l'acide carbonique. 136
Des explosions des machines à vapeur. *Ibid.*

DE L'ÉLECTRICITÉ.

Des lois qui suivent les actions électriques. 140
Perte de l'électricité par l'air et par les supports. 143
Disposition de l'électricité à la surface des corps. 145
Des machines électriques. 149
Des électricités dissimulées. 150
De la bouteille de Leyde. 155
Charge par cascade. *Ibid.*
Des batteries électriques. 156
Effets mécaniques de l'électricité. *Ibid.*
Des électroscopes. 157
Électroscope-condensateur. 158
De la lumière électrique. *Ibid.*
Électricité des nuages. — Électricité atmosphérique. — Paratonnerres. 160
Explications des mouvemens excités dans les corps par l'electricité. 163
Électricité développée par la pression. 164
Électricité développée par le contact. *Ibid.*
Piles sèches. 166
Effets de la pile. 168
Des substances qui ont, par rapport à l'électricité galvanique, une faculté conductrice particulière. 175
Phénomènes thermo-électrodynamiques. *Ibid.*
Phénomènes thermo-électro-statiques. 177
De l'électricité développée dans les phénomènes chimiques. 178

MAGNÉTISME.

Propriétés générales des aimans. 180
Lois des actions magnétiques. 181
Des procédés d'aimantation. 182
Distribution du magnétisme. 184
Action magnétique du globe. 186
Déclinaison. *Ibid.*
De l'inclinaison. 188
Équateur magnétique. 189
De l'intensité de l'action magnétique du globe. *Ibid.*
Moyen de corriger les déviations de la boussole par l'action du fer. 191
De l'action réciproque des aimans et des différens corps. 193
Du magnétisme en mouvement. *Ibid.*
Phénomènes électro-dynamiques. 195
Attraction et répulsion des courans électriques. 196
Courans fermés et solénoïdes. 198
Action réciproques des solénoïdes. 200
Actions des solénoïdes sur les fils conducteurs. 201
Expériences sur l'action mutuelle des aimans et des courans. 204
De l'action de la terre sur les conducteurs voltaïques. 206
Conducteurs astatiques. 207
De l'aimantation produite par les courans électriques. 208
Description d'un appareil pour les phénomènes électro-dynamiques. 209
Expériences sur l'action mutuelle des deux courans rectilignes, etc. 211
Expériences relatives à la rotation continue déterminée par un conducteur fixe, etc. 212
Explications relatives aux hélices ou solénoïdes. *Ibid.*
Du multiplicateur. 213
Des poisons électriques. *Ibid.*

DE L'OPTIQUE.

Propriétés de la lumière. 215
Réflexion de la lumière. 216
Caustiques. 219
De la réfraction. *Ibid.*
Lentilles. 221
Indices de réfractions. 224
Puissances réfractives des gaz, etc. 226
Indices de réfraction de quelques substances. 227
Phénomène de la réflexion totale. *Ibid.*
Décomposition de la lumière. 229
De la vision. — Structure de l'œil. 231
De l'arc-en-ciel. 236
Des principaux instrumens d'optique. *Ibid.*
Loupe, ou microscope simple. 239
Microscope solaire. *Ibid.*
Mégascope. 240
Chambre obscure. *Ibid.*

Microscope composé. 240
Lunette astronomique. 243
Lunette terrestre. *Ibid.*
Lunette de Galilée. 244
Télescopes. 245
Microscope catadioptrique. 246
Généralités sur les lunettes. *Ibid.*
Instrumens fondés sur la réflexion de la lumière. 249
Systèmes d'optique. 251
De la Réflexion et de la Réfraction. 254
Double réfraction. 256
Micromètre à double image. 260
De la polarisation de la lumière. 262
Intensité de la lumière réfléchie. 266
Mouvement du plan de polarisation. *Ibid.*
De la diffraction. 272
Expériences principales. 273
Anneaux colorés. 277
De l'Héliostat. 281
Comparaison des intensités de deux lumières. *Ibid.*

ACOUSTIQUE.

Propagation du son. 285
Vibrations des corps solides ou liquides. 287
Instrumens à vent. 293
Communication des mouvemens vibratoires. 298
Organe de l'ouïe et de la voix. 299
De l'ouïe. *Ibid.*
De la voix. 300

MÉTÉOROLOGIE.

Pluie. 302
Rosée. *Ibid.*
Brouillards. *Ibid.*
Neige. 304
Grêle. *Ibid.*
Trombe. *Ibid.*
Halos. *Ibid.*
Aérolithes. 305
Aurore boréale. 306
Vents. *Ibid.*
Températures des différens climats. 308
Températures des deux hémisphères. 310
Températures du globe à diverses profondeurs. *Ibid.*
Froids des lieux élevées. 311
Neiges perpétuelles. 312
Températures des mers. 313
Sources de chaleur. 315
Sources de la chaleur animale. 317
Notes. 321

FIN DE LA TABLE.

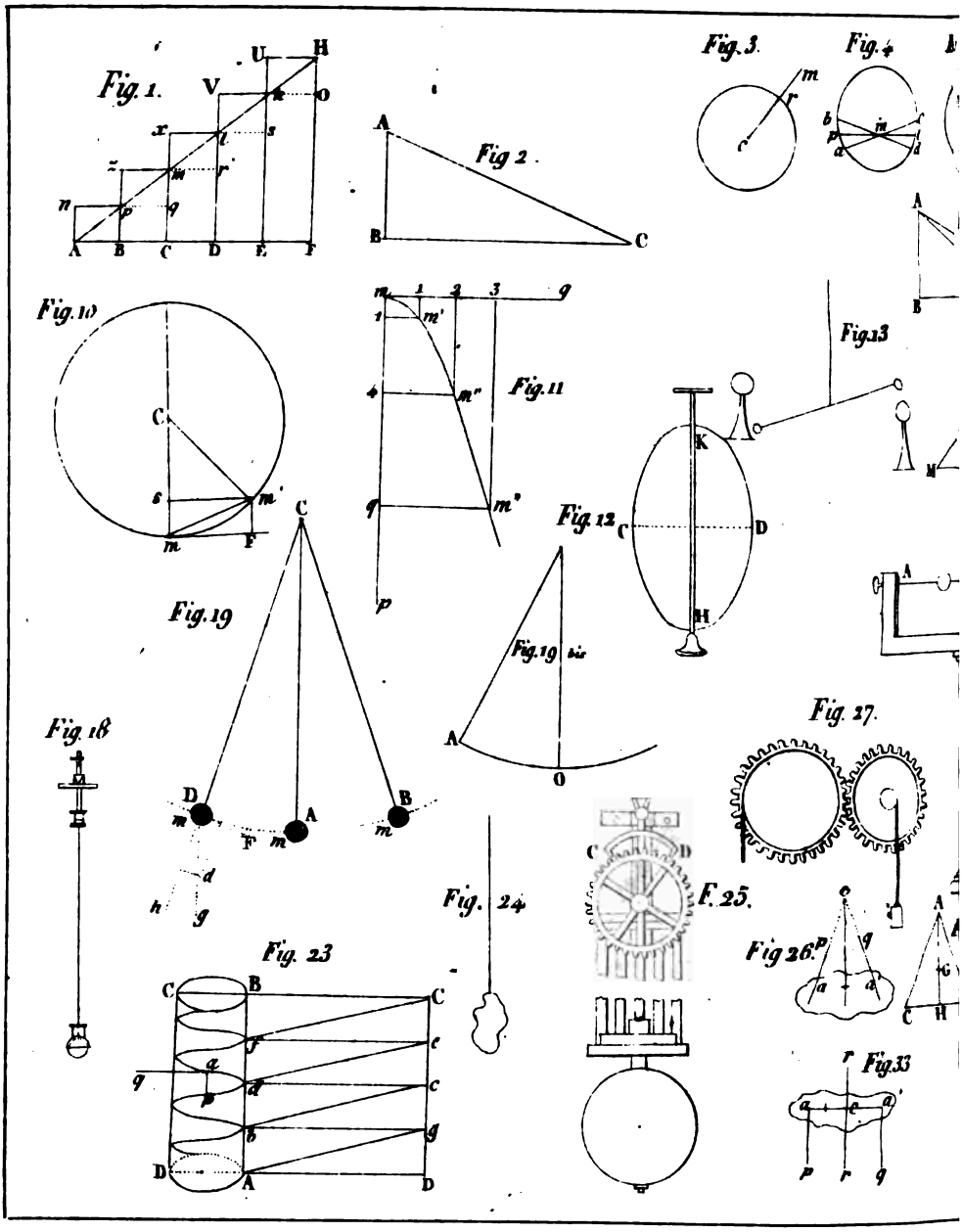


Fig. 1.
Fig 2.
Fig. 3.
Fig. 4
Fig. 10
Fig. 11
Fig. 12
Fig. 13
Fig. 19
Fig. 19 bis
Fig. 18
Fig. 23
Fig. 24
F. 25.
Fig. 26.
Fig. 27.
Fig. 33

3° Qu'il y a exhalation d'azote dans la respiration des mammifères carnivores ou frugivores, et dans la respiration des oiseaux; que la quantité d'azote exhalée est plus grande chez les frugivores que chez les carnivores;

4° Que, dans le développement de la chaleur animale, la respiration produit chez les carnivores une portion moins considérable de la chaleur animale totale que chez les frugivores, et qu'il en est de même des oiseaux, comparés aux mammifères.

Nota. J'ai constaté depuis l'approbation donnée à mon travail par l'Académie, que dans la respiration des grenouilles il y a dégagement d'azote.

(D'après les expériences présentées par M. Dulong à l'Académie, peu de temps avant d'être reçu membre de cette illustre société, et peu de temps avant la clôture du concours, la respiration produirait une portion moindre de la chaleur totale. Cette différence tient à ce que ce savant a pris pour calculer ses expériences les nombres fournis par Lavoisier et Laplace sur la combustion du carbone et de l'hydrogène. La différence la plus notable entre mon appareil et celui de M. Dulong consiste en ce que, dans ce dernier, le gaz était reçu dans un gazomètre plein d'eau, où il était défendu de l'action dissolvante du liquide par un flotteur, tandis que dans le mien le gaz était reçu immédiatement sur le mercure.)

C'est donc dans la respiration que l'homme et les animaux puisent la plus grande partie de la chaleur qui maintient leur température supérieure à celle des corps environnans, et qui leur permet de vivre dans une atmosphère dont la température est celle de la congélation du mercure, c'est-à-dire 39° au-dessous de zéro. Les habitans des régions boréales se trouvent une partie de l'année exposés à un pareil froid. Ainsi l'homme et les animaux à sang chaud peuvent supporter souvent sans danger le contact de l'air quand celui-ci a une température qui diffère en moins de près de 80° de la leur. Ils possèdent en eux la faculté d'augmenter la chaleur qu'ils développent dans un temps donné; mais ils ne possèdent pas à un aussi grand degré celle de la diminuer. On a vu souvent sous l'équateur des hommes mourir subitement quand la température s'élevait à 40°. Cependant des exemples prouvent que nous pouvons résister à des températures assez élevées.

MM. Banks, Blagden et Fordyce, s'étant exposés à une chaleur de près de 125°, ont conservé sensiblement la même température. MM. Berger et Delaroche, s'étant placés dans une étuve à 49°, n'ont trouvé leur température augmentée que de 4° environ. M. Laroche, étant resté seul 16 minutes dans une température de 90°, a vu la sienne s'accroître de 5°. C'est surtout dans la transpiration, qui devient dans ce cas très abondante, qu'il faut chercher l'explication de ce fait.

Si la respiration est la cause principale de la chaleur animale, celle-ci devra s'affaiblir toutes les fois que la première sera affaiblie. C'est ce qui a été parfaitement constaté par les expériences de Legallois. Cet ingénieux physiologiste a vu qu'un animal se refroidit quand on lui fait respirer un air raréfié, et qu'on le place dans une position propre à gêner la respiration, etc. (*Ann. de Chim. et de Phys.*, t. 4.) (1).

(1) La respiration est, ou bien *aérienne*, lorsque l'animal respire l'air en nature, ou bien *aquatique*, lorsque l'animal respire dans l'eau, en soustrayant à celle-ci l'air qu'elle tient en dissolution.

Les animaux aériens respirent, soit au moyen des poumons, soit au moyen de trachées (on appelle *trachées* des vaisseaux élastiques qui reçoivent l'air par des stigmates percés sur les côtés de l'animal, et le distribuent en se ramifiant à l'infini dans tous les points du corps).

Les animaux aquatiques respirent par des branchies.

Les mammifères, les oiseaux et les reptiles respirent l'air en nature par des poumons. Il en est de même d'une partie des mollusques et de certains arachnides.

Les poissons, les batraciens dans leur jeune âge, la plus grande partie des mollusques et des annélides, enfin tous les crustacés respirent dans l'eau et au moyen des branchies.

Une partie des arachnides et les insectes respirent par des trachées.

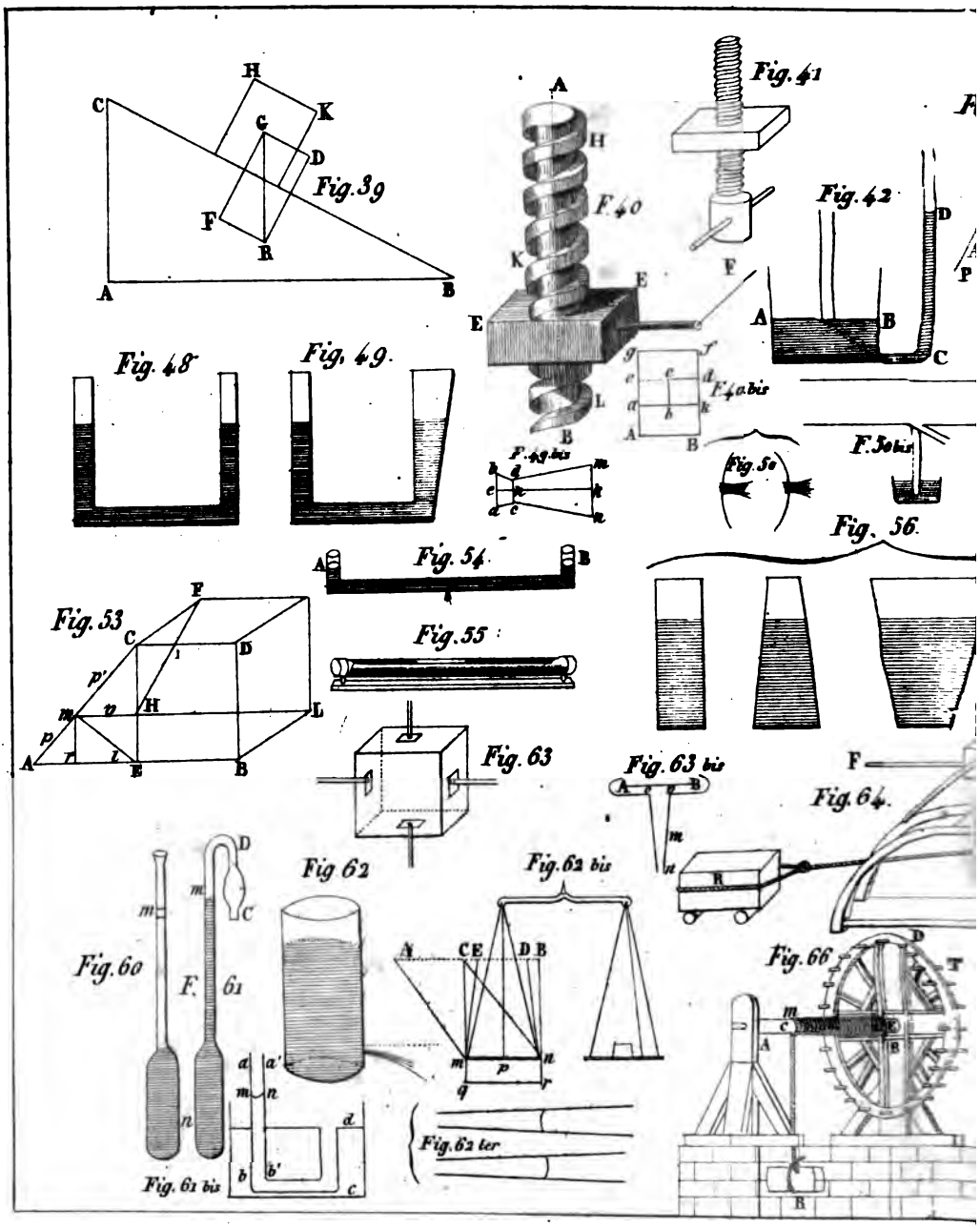


Fig. 39
Fig. 40
Fig. 41
Fig. 42
Fig. 48
Fig. 49.
F. 49 bis
F. 40 bis
Fig. 50
F. 50 bis
Fig. 53
Fig. 54
Fig. 55
Fig. 56.
Fig. 60
F. 61
Fig. 61 bis
Fig 62
Fig. 62 bis
Fig. 62 ter
Fig. 63
Fig. 63 bis
Fig. 64.
Fig. 66

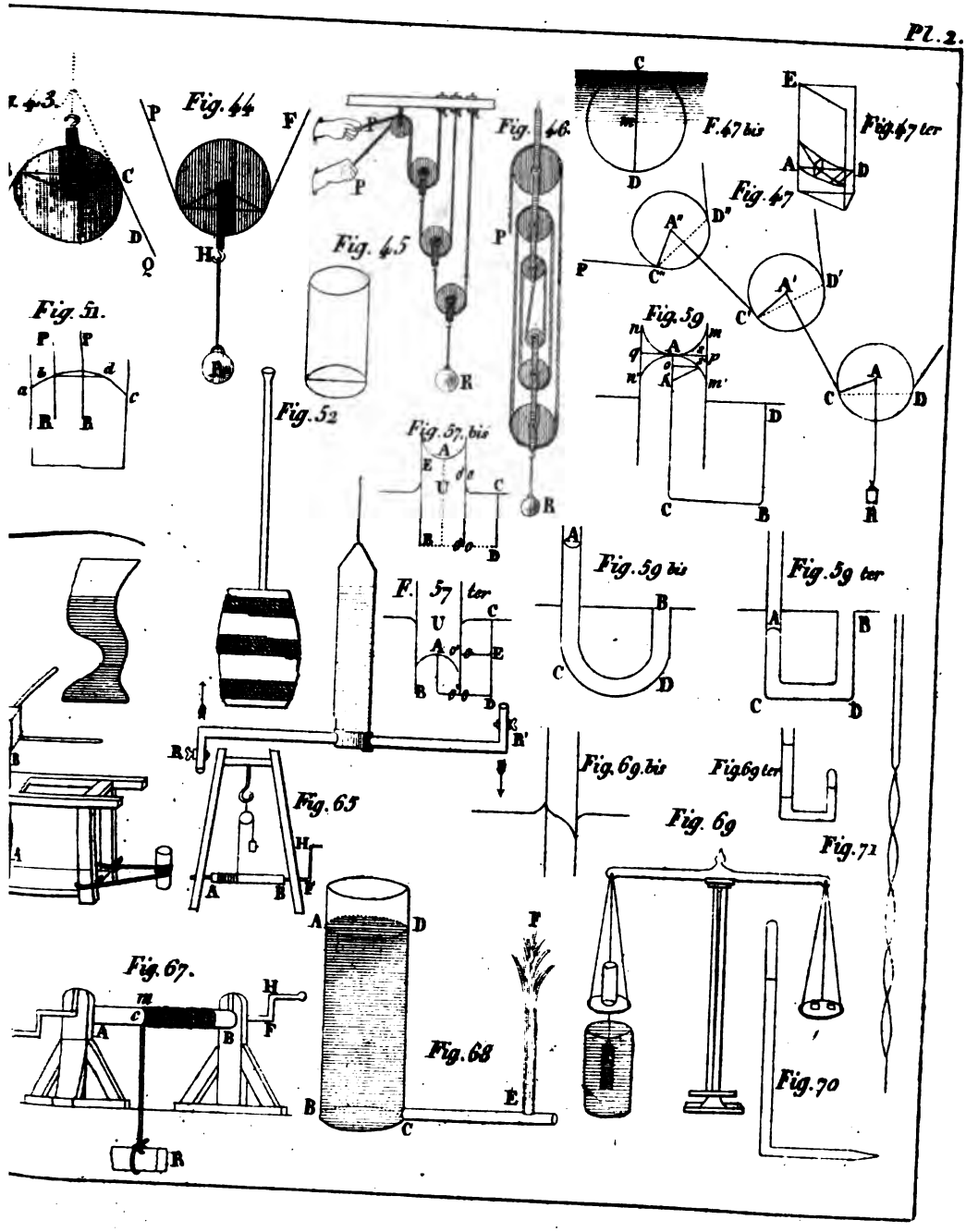


Fig. 43.
Fig. 44
Fig. 45
Fig. 46.
F. 47 bis
Fig. 47 ter
Fig. 47
Fig. 51.
Fig. 52
Fig. 57 bis
F. 57 ter
Fig. 59
Fig. 59 bis
Fig. 59 ter
Fig. 65
Fig. 69 bis
Fig. 69 ter
Fig. 69
Fig. 71
Fig. 67.
Fig. 68
Fig. 70

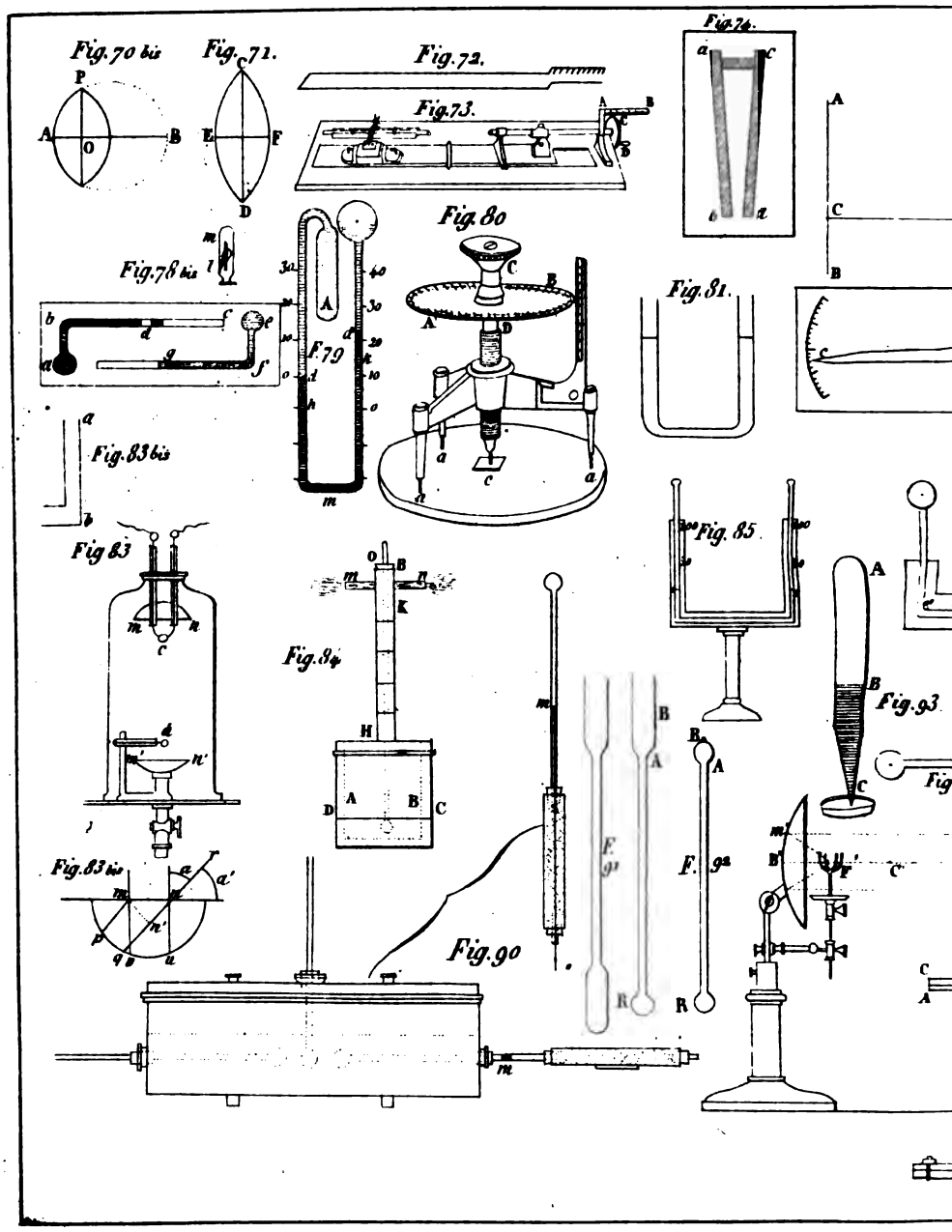


Fig. 70 bis
Fig. 71.
Fig. 72.
Fig. 73.
Fig. 74.
Fig. 78 bis
Fig. 79
Fig. 80
Fig. 81.
Fig. 83 bis
Fig. 83
Fig. 84
Fig. 85
Fig. 93
Fig. 83 bis
Fig. 90
F. 91
F. 92

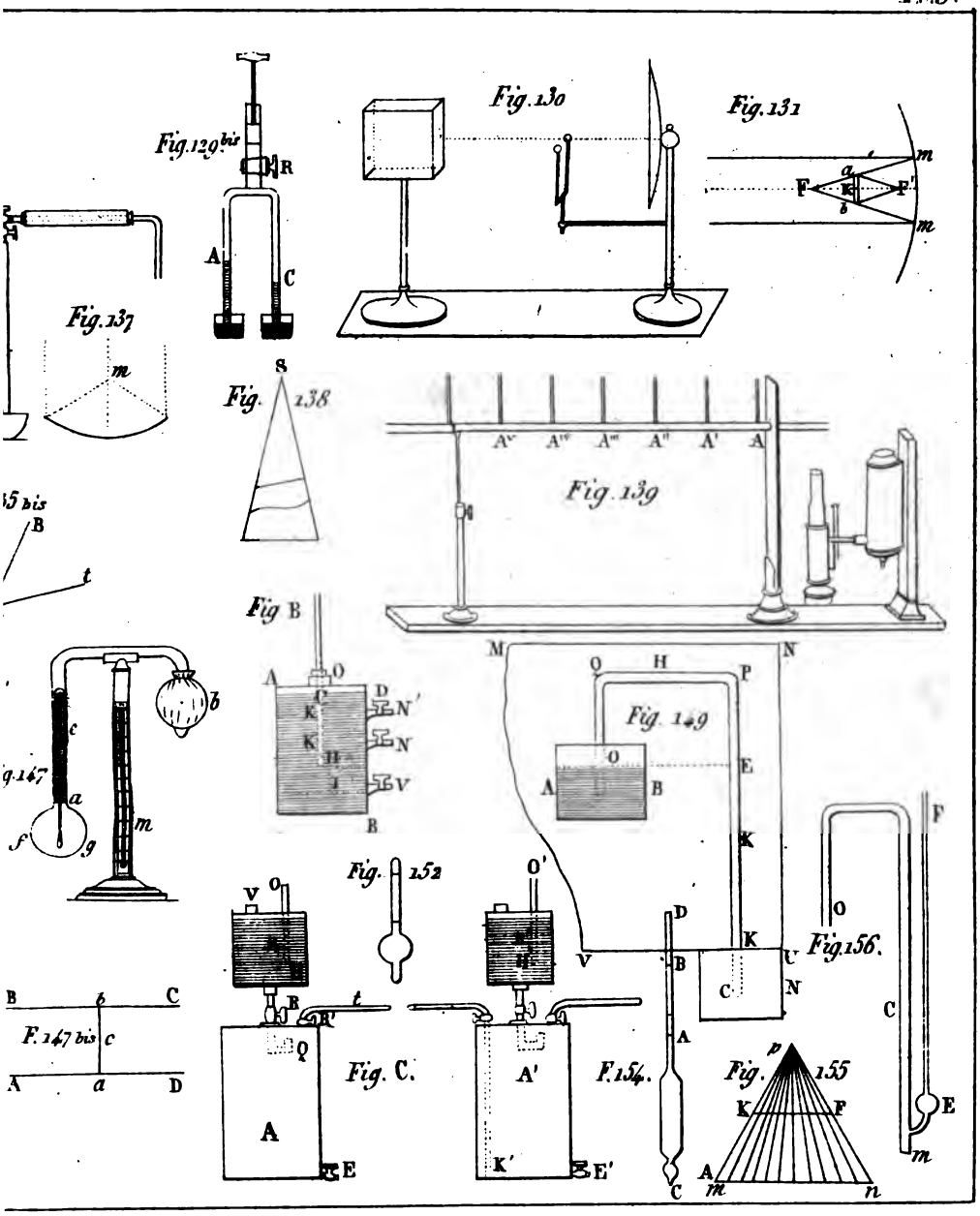


Fig. 129 bis
R
A
C
Fig. 130
Fig. 131
m
a
F
K
P'
b
m
Fig. 137
m
S
Fig. 138
A'' A''' A'' A' A
Fig. 139
5 bis
B
t
Fig B
A
O
C
D
K
N'
K
N
H
J
V
B
b
c
g. 147
a
f
g
m
M
N
Q
H
P
Fig. 149
O
E
A
B
K
Fig. 152
V
O
O'
H'
V
B
U
K
D
C
N
A
Q
Fig. C.
A'
F. 154.
Fig. 155
K
F
A
m
n
C
K'
E'
E
F
O
Fig. 156.
C
E
m
B
b
C
F. 147 bis
c
A
a
D

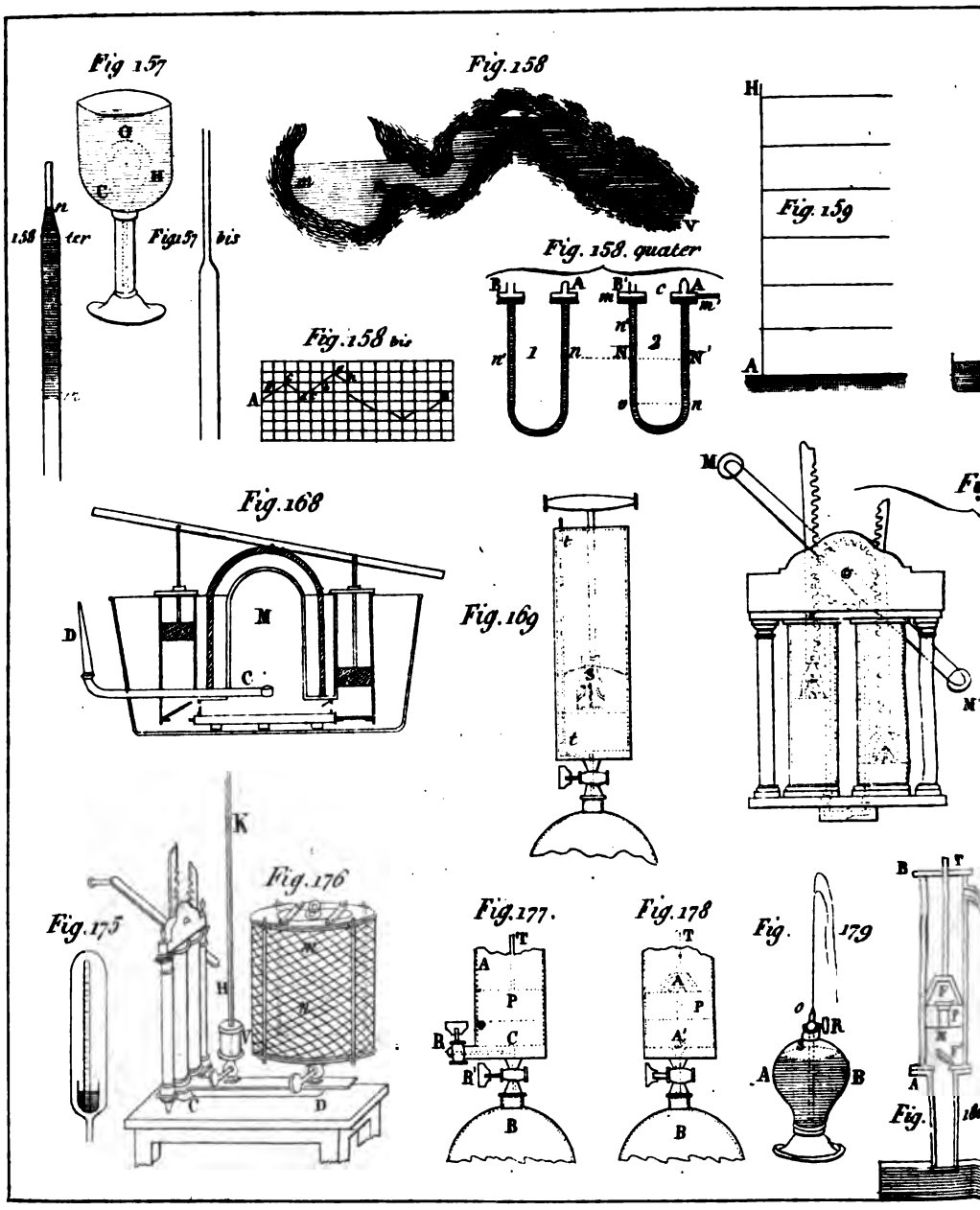


Fig 157
Fig. 158
Fig. 159
Fig. 158 ter
Fig. 157 bis
Fig. 158. quater
Fig. 158 bis
Fig. 168
Fig. 169
Fig. 175
Fig. 176
Fig. 177.
Fig. 178
Fig. 179

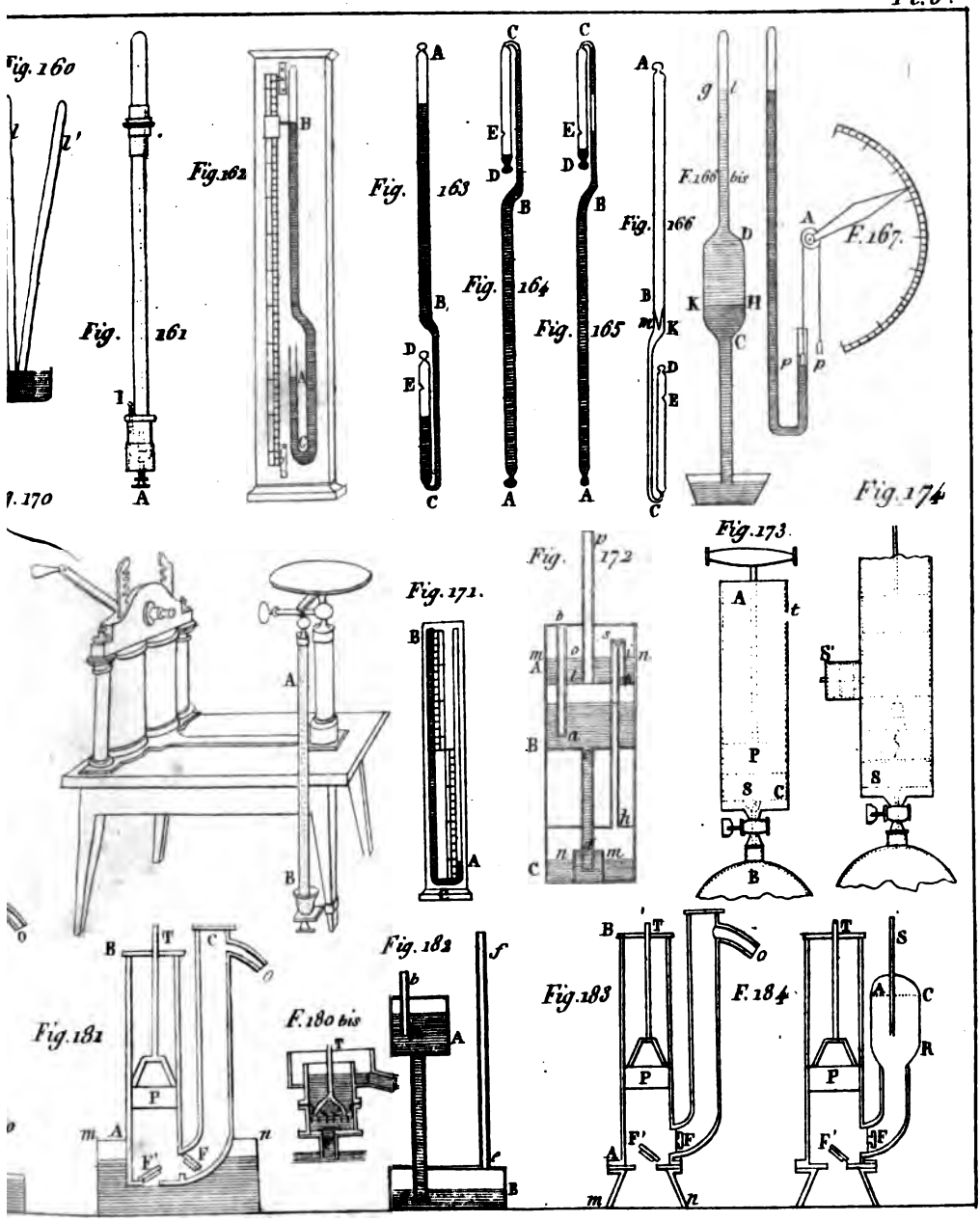


Fig. 160
Fig. 161
Fig. 162
Fig. 163
Fig. 164
Fig. 165
Fig. 166
F. 166 bis
F. 167.
Fig. 170
Fig. 171.
Fig. 172
Fig. 173.
Fig. 174
Fig. 181
F. 180 bis
Fig. 182
Fig. 183
F. 184

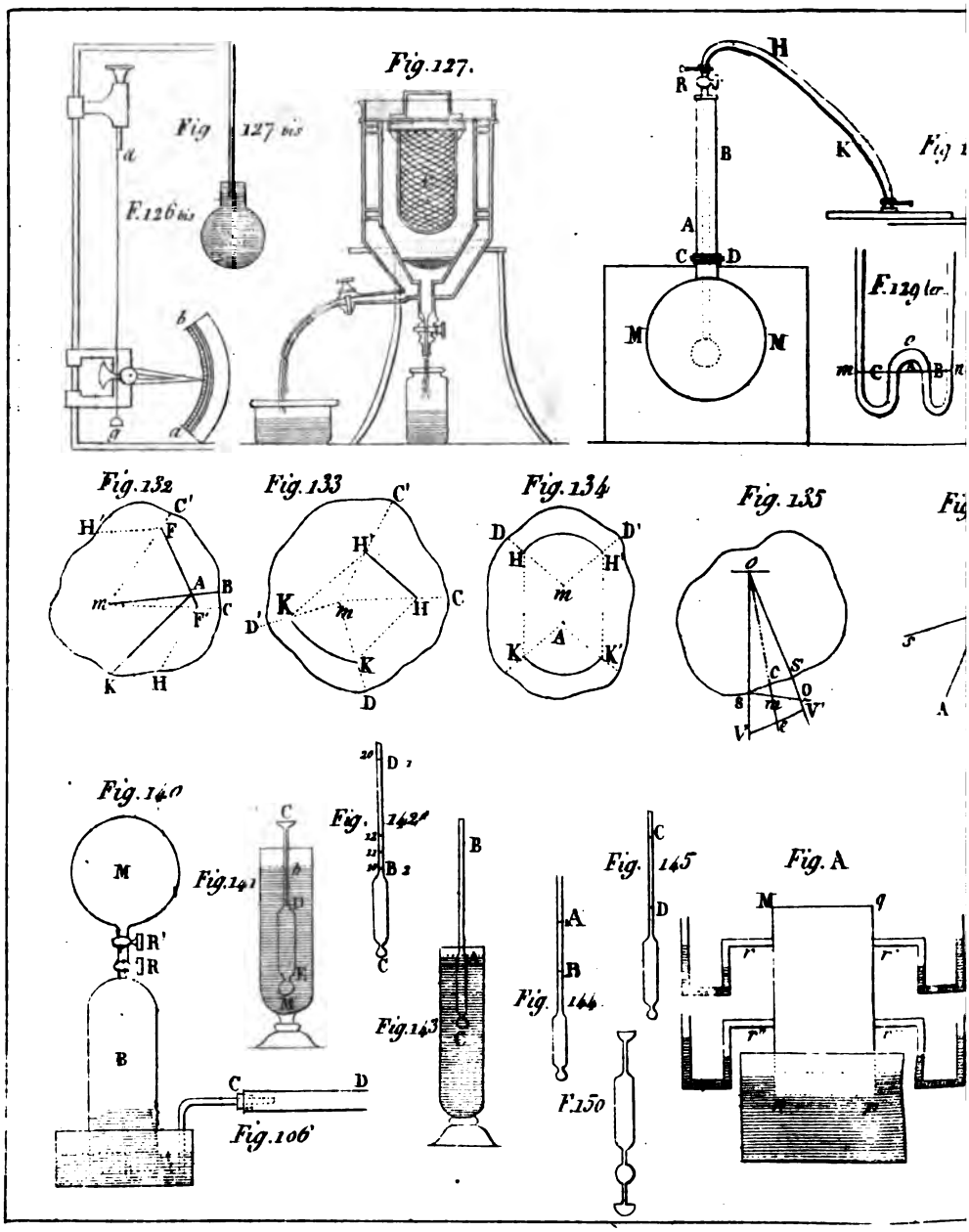


Fig. 127.
Fig 127 bis
F. 126 bis
Fig. 132
Fig. 133
Fig. 134
Fig. 135
Fig. 140
Fig. 141
Fig. 142
Fig. 143
Fig. 144
Fig. 145
Fig. A
F. 150
Fig. 106

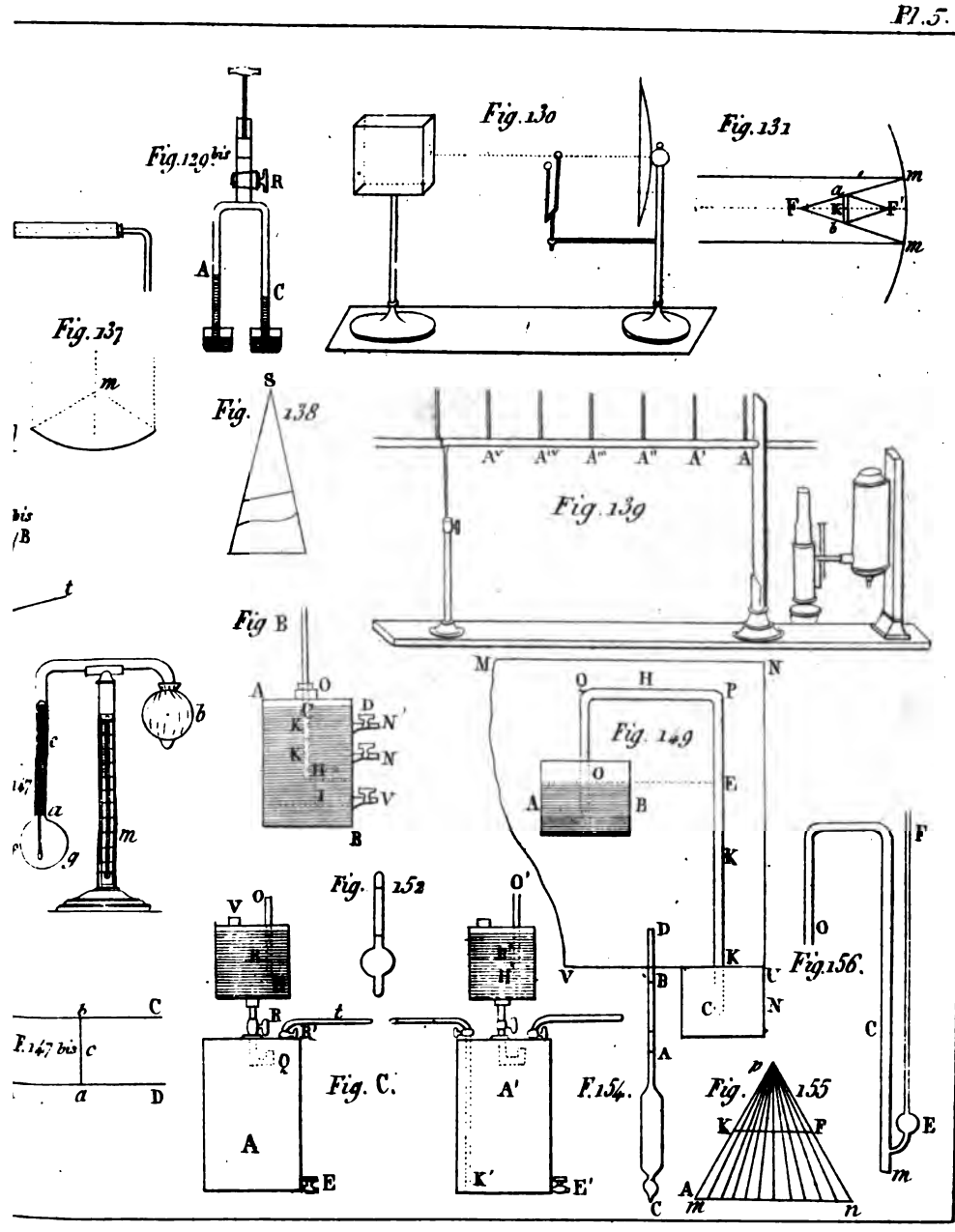


Fig. 129 bis
R
A
C
Fig. 130
Fig. 131
m
a
F
K
F'
b
m
Fig. 137
m
S
Fig. 138
A'
A''
A'''
A''
A'
A
Fig. 139
t
Fig B
A
O
C
D
K
N'
K
N
H
I
V
B
b
c
a
m
g
M
N
O
H
P
Fig. 149
O
E
A
B
K
F
Fig. 152
V
O
O'
H
V
D
B
K
C
N
Fig. 156.
O
C
E
m
C
b
F. 147 bis
c
a
D
t
R
R'
Q
Fig. C.
A
E
A'
K'
E'
F. 154.
A
C
Fig. 155
p
K
F
A
m
n

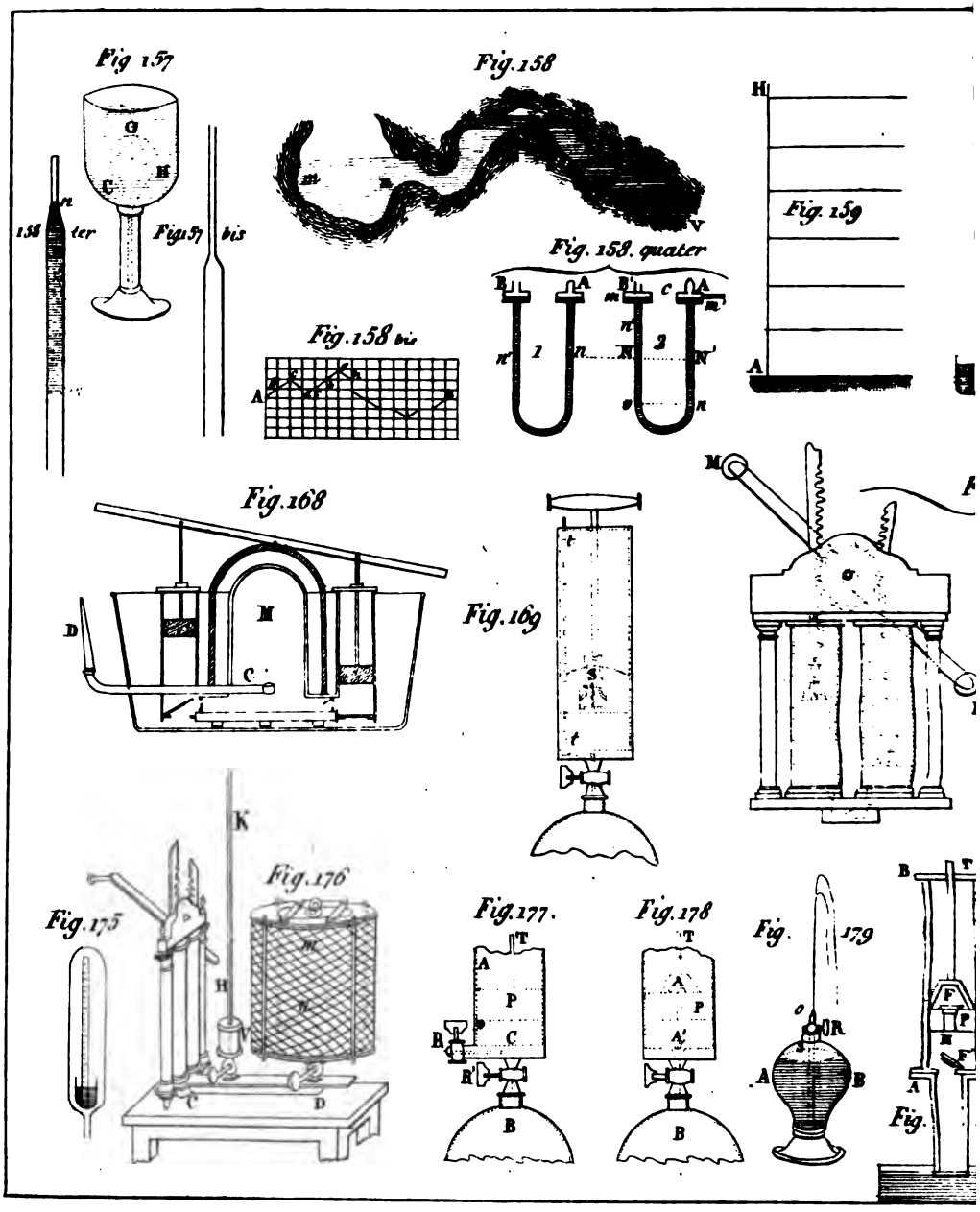


Fig 157
Fig. 158
Fig. 159
Fig. 158 ter
Fig. 157 bis
Fig. 158 bis
Fig. 158. quater
Fig. 168
Fig. 169
Fig. 175
Fig. 176
Fig. 177.
Fig. 178
Fig. 179

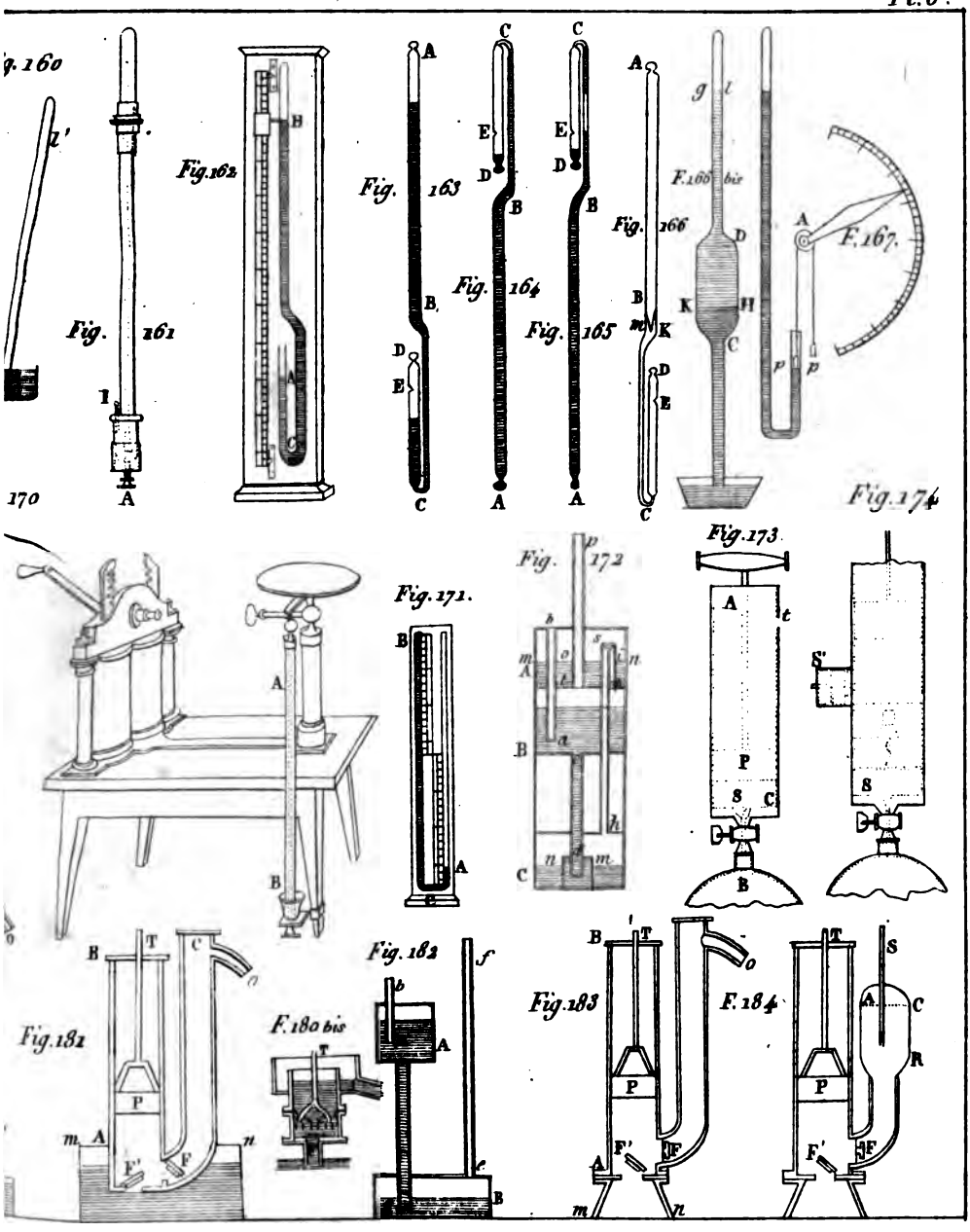


Fig. 160
Fig. 161
Fig. 162
Fig. 163
Fig. 164
Fig. 165
Fig. 166
F. 166 bis
F. 167.
Fig. 170
Fig. 171.
Fig. 172
Fig. 173.
Fig. 174
Fig. 181
F. 180 bis
Fig. 182
Fig. 183
F. 184

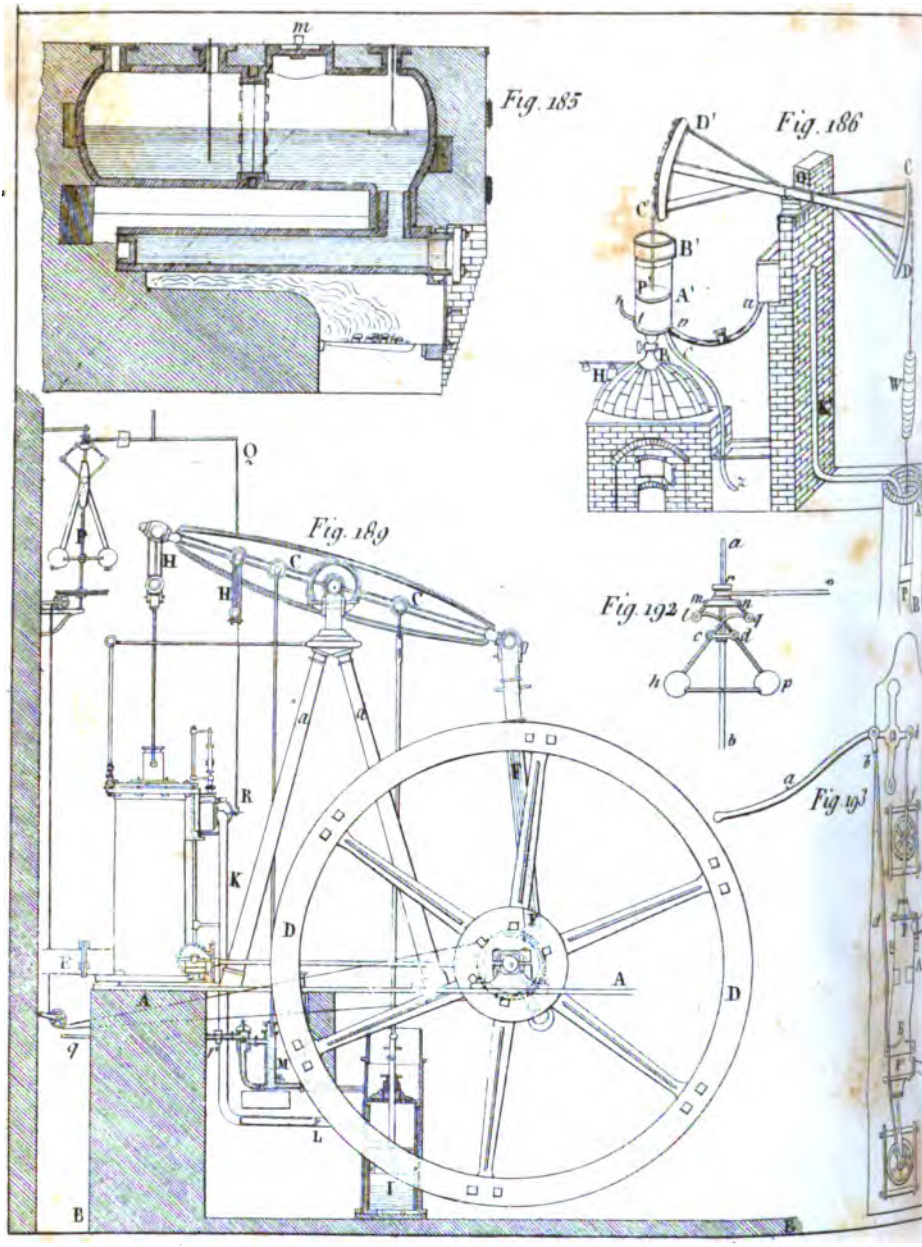
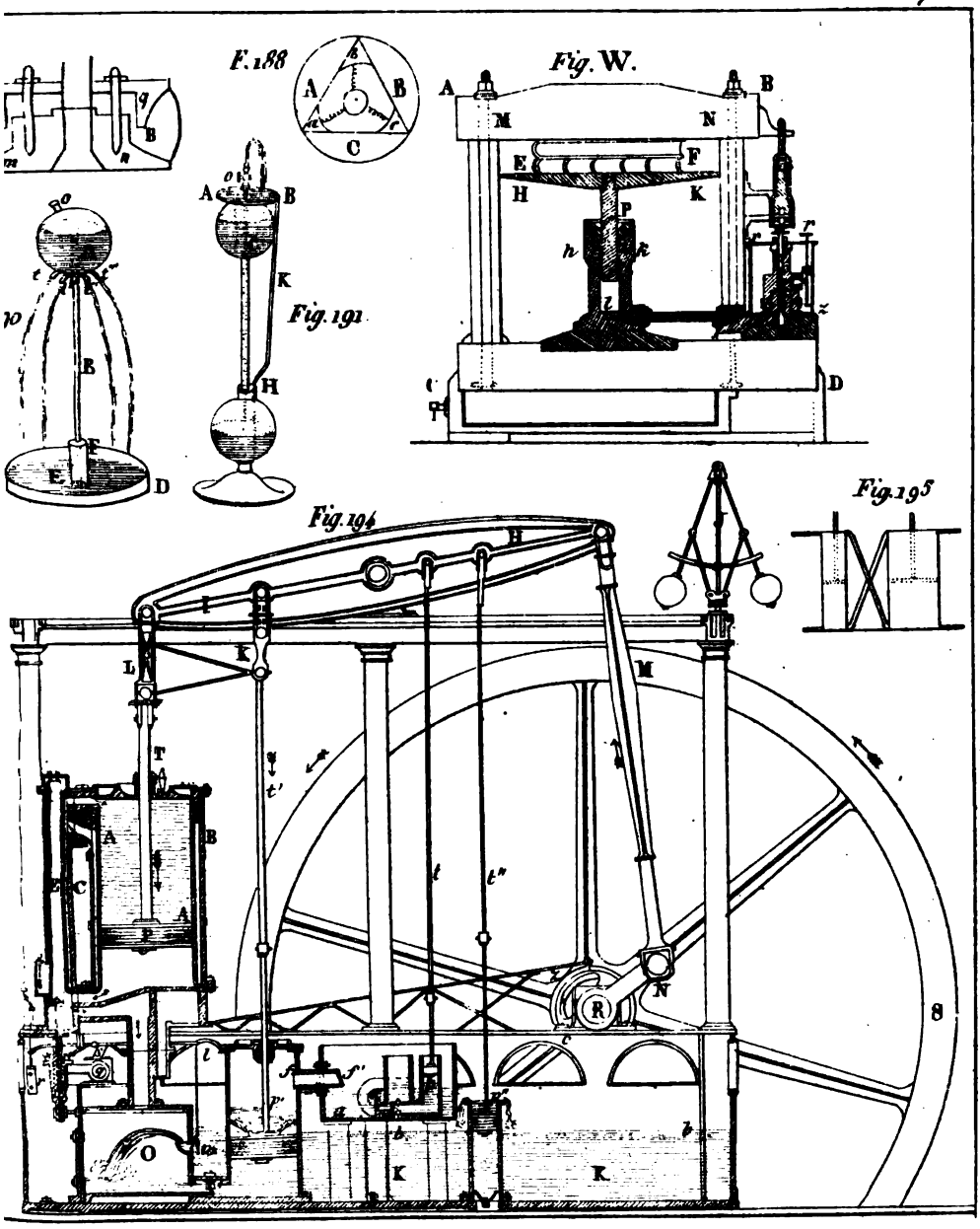


Fig. 185
Fig. 186
Fig. 189
Fig. 192
Fig. 193
m
D'
C'
B'
A'
H
W
Q
P
C
R
K
D
A
E
M
L
I
B
F
a
b
c
d
h
p


F. 188
Fig. W.
Fig. 191
Fig. 194
Fig. 195

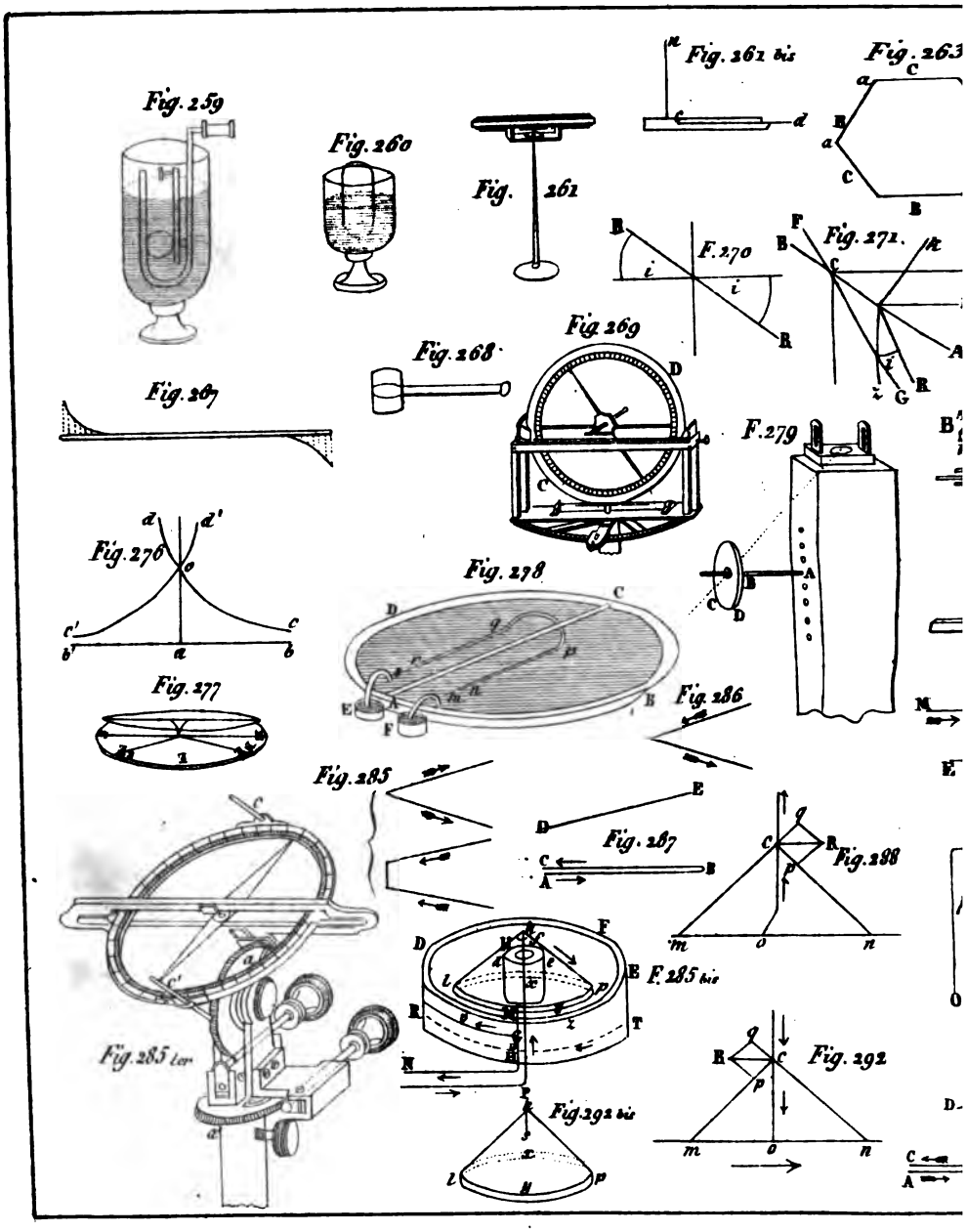


Fig. 259
Fig. 260
Fig. 261
Fig. 261 bis
Fig. 263
F. 270
Fig. 271.
Fig. 268
Fig. 269
Fig. 267
F. 279
Fig. 276
Fig. 278
Fig. 277
Fig. 286
Fig. 285
Fig. 287
Fig. 288
F. 285 bis
Fig. 285 ter
Fig. 292
Fig. 292 bis

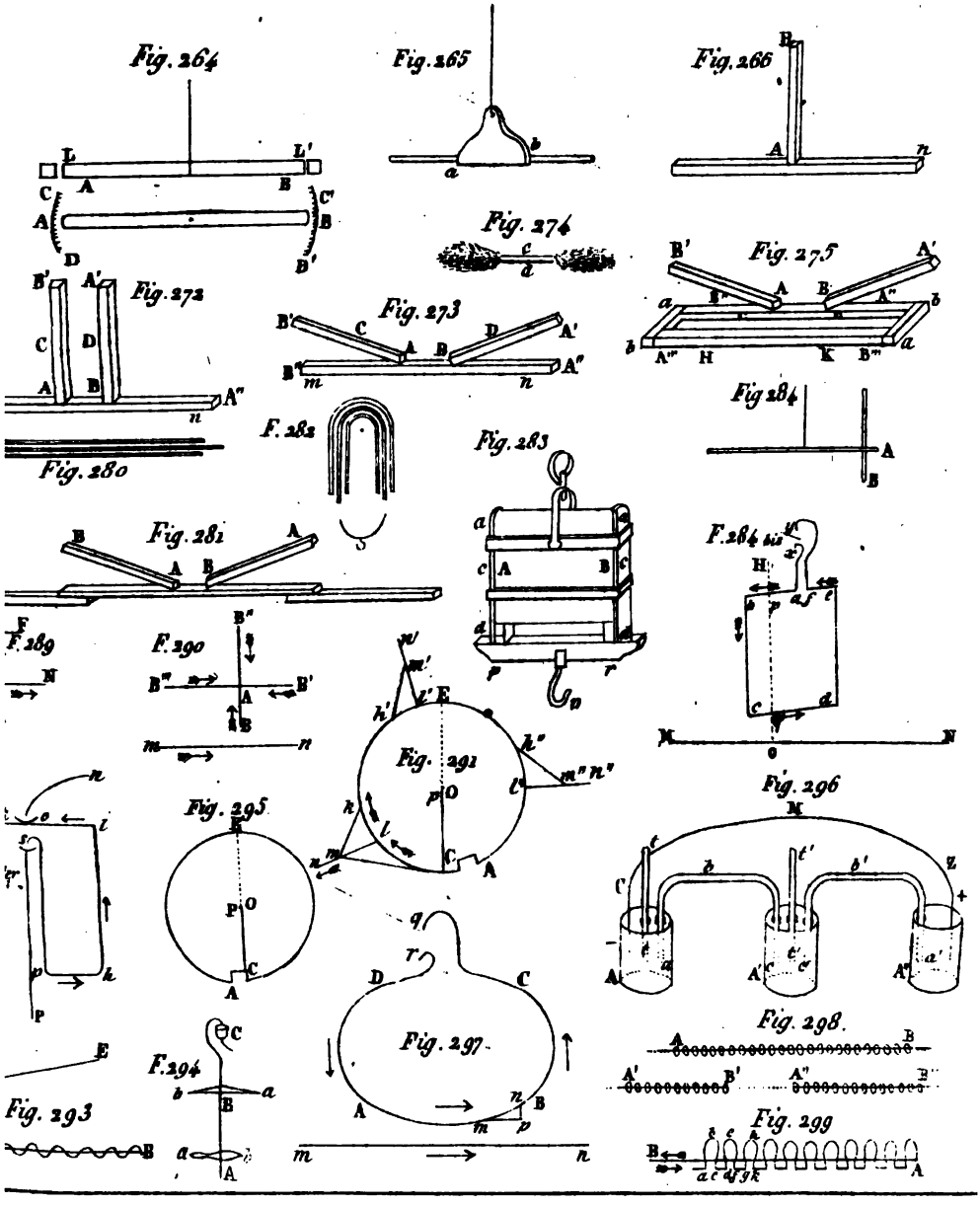


Fig. 264
Fig. 265
Fig. 266
Fig. 272
Fig. 273
Fig. 274
Fig. 275
Fig. 280
F. 282
Fig. 283
Fig 284
Fig. 281
F. 284 bis
F. 289
F. 290
Fig. 291
Fig. 293
Fig. 294
Fig. 295
Fig. 296
Fig. 297
Fig. 298
Fig. 299

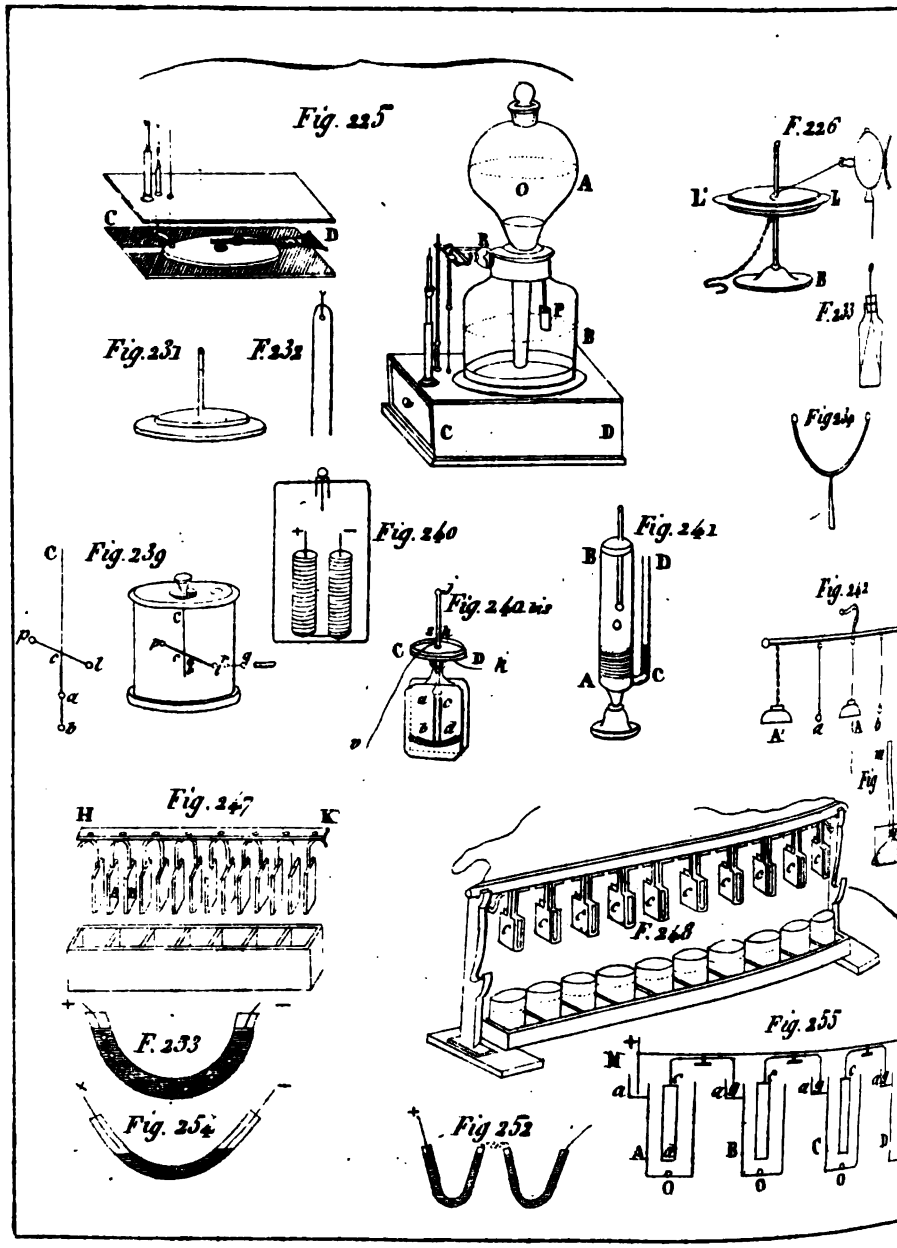


Fig. 225
F. 226
Fig. 231
F. 232
F. 233
Fig. 234
Fig. 239
Fig. 240
Fig. 241
Fig. 242
Fig. 247
F. 248
F. 253
Fig. 254
Fig. 252
Fig. 255

Fig. 303.

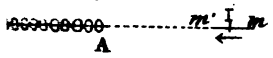


Fig. 304

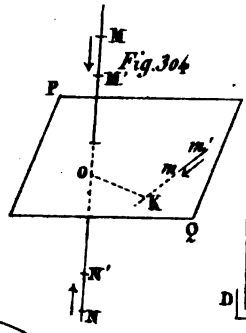


Fig. 305.

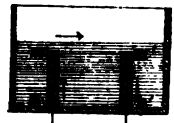


Fig. 306

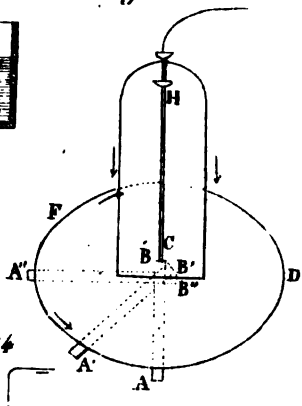


Fig. 306 bis

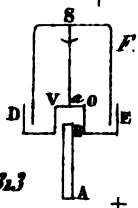


Fig. 311

Fig. 312

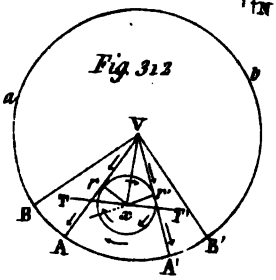


Fig. 313

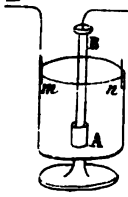


Fig. 314

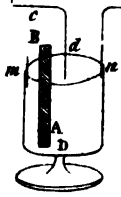
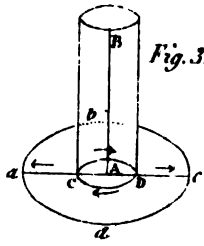


Fig. 315



322

Fig. 322 bis

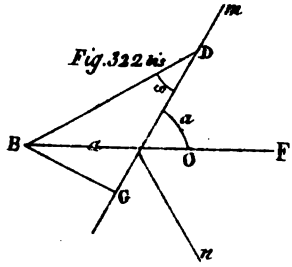


Fig. 324

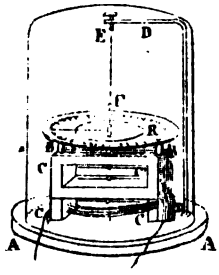
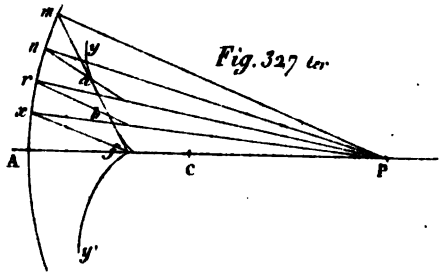


Fig. 325

ig. 327 bis

Fig. 327 ter



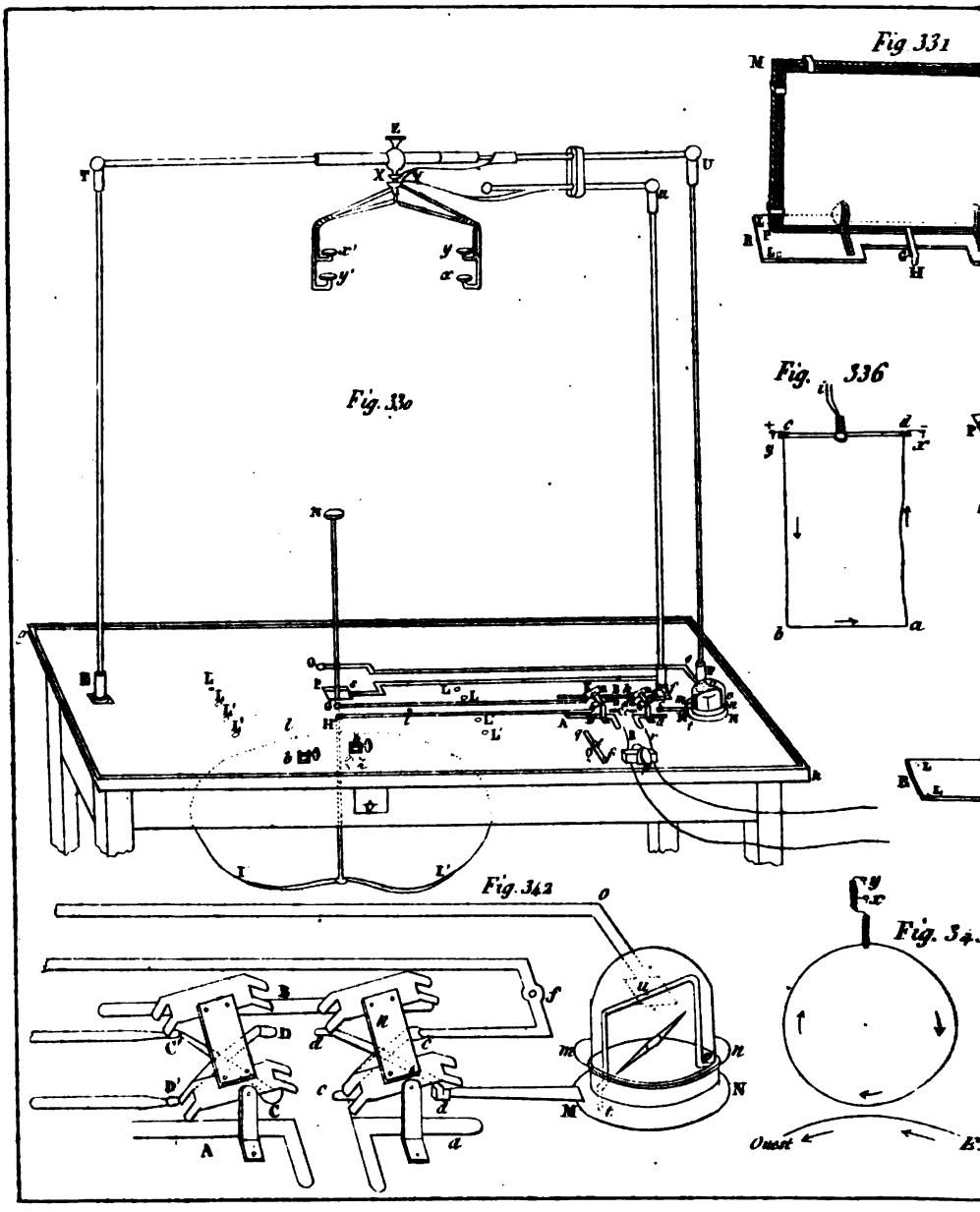


Fig 331
Fig. 336
Fig. 330
Fig. 342
Fig. 34
Ouest

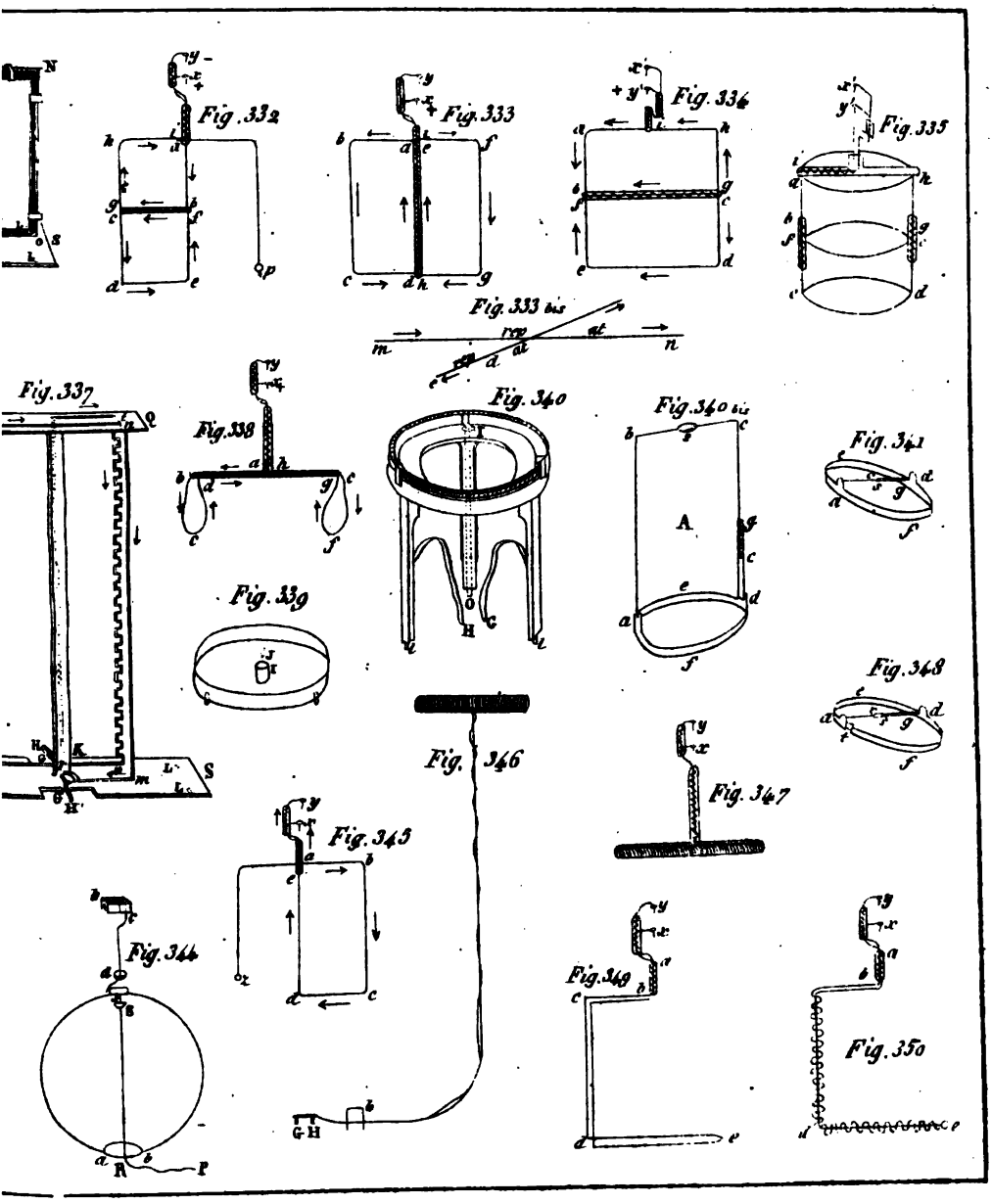


Fig. 332
Fig. 333
Fig. 334
Fig. 335
Fig. 333 bis
Fig. 337
Fig. 338
Fig. 339
Fig. 340
Fig. 340 bis
Fig. 341
Fig. 342
Fig. 343
Fig. 344
Fig. 346
Fig. 347
Fig. 349
Fig. 350

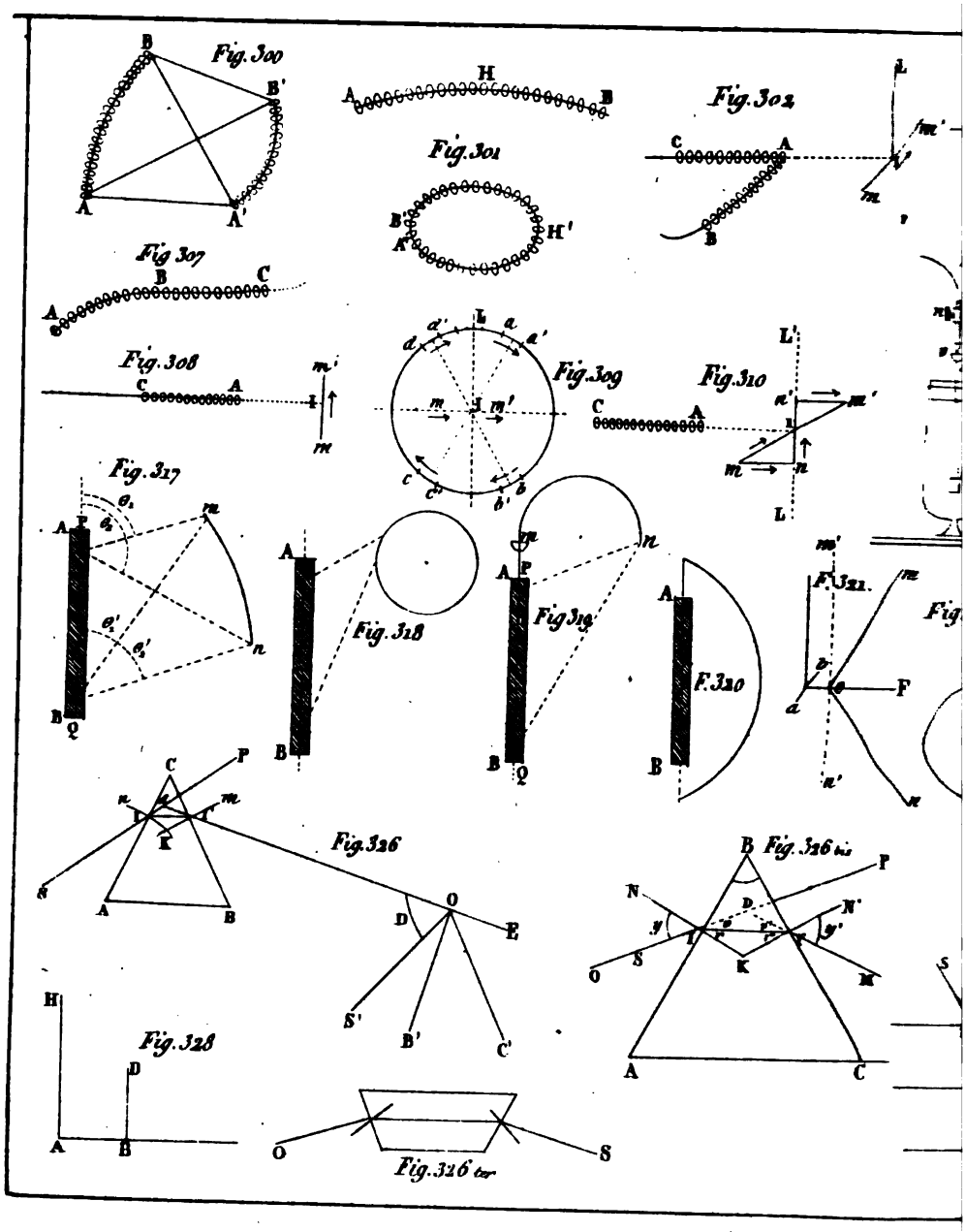


Fig. 300
Fig. 301
Fig. 302
Fig. 307
Fig. 308
Fig. 309
Fig. 310
Fig. 317
Fig. 318
Fig. 319
F. 320
F. 321
Fig. 326
Fig. 326 bis
Fig. 328
Fig. 326 ter

Fig. 303.

Fig. 304

Fig. 305.

Fig. 306

F. 306 bis

Fig. 313

Fig. 313

Fig. 314

Fig. 315

Fig. 322 bis

Fig. 324

Fig. 325

Fig. 327 bis

Fig. 327 ter

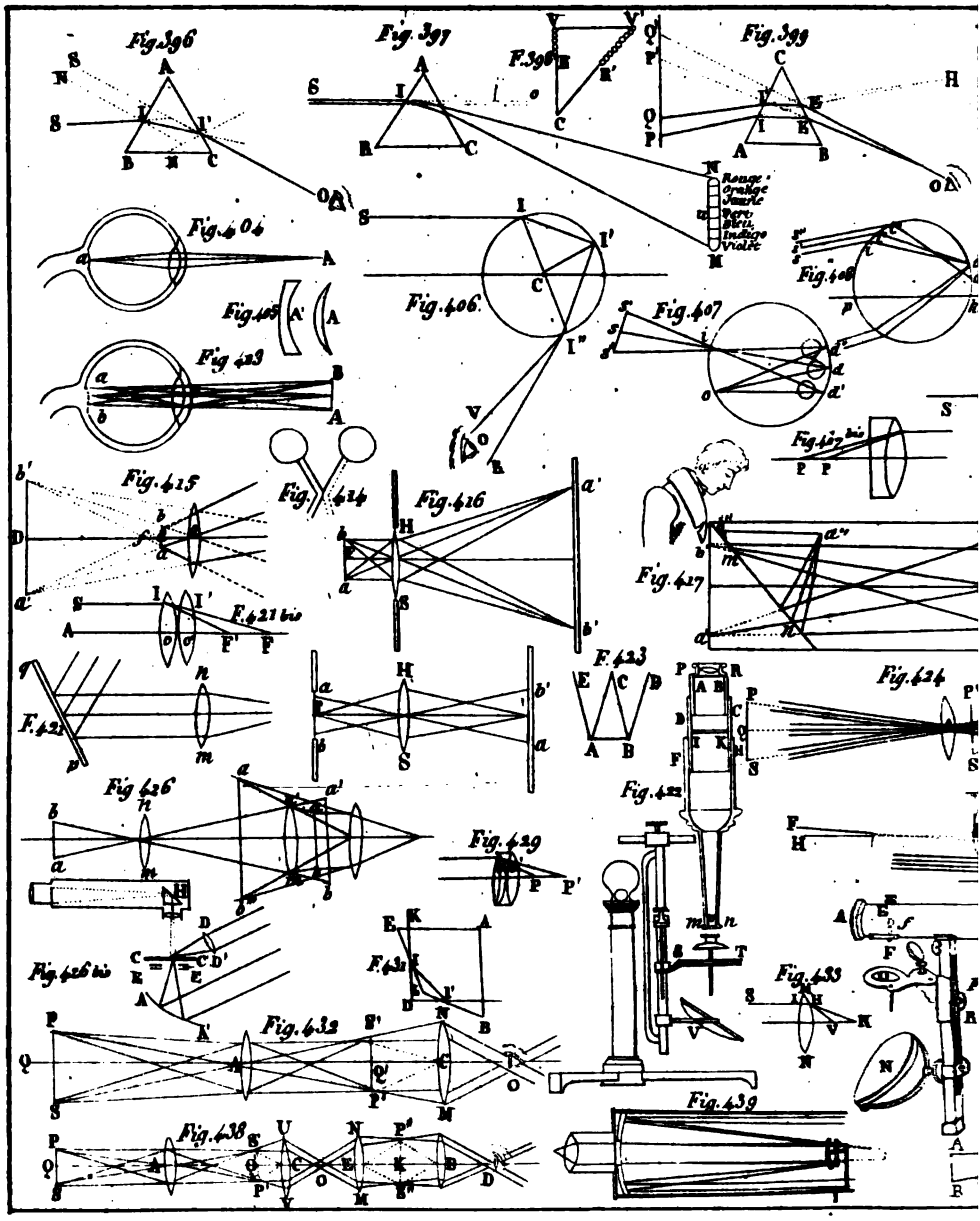


Fig. 396
Fig. 397
F. 398
Fig. 399
Rouge
Orange
Jaune
Vert
Bleu
Indigo
Violet
Fig. 404
Fig. 405
Fig. 406
Fig. 407
Fig. 408
Fig. 409
Fig. 415
Fig. 414
Fig. 416
Fig. 417
Fig. 417 bis
F. 421 bis
F. 421
F. 423
Fig. 424
Fig. 426
Fig. 429
Fig. 422
Fig. 426 bis
F. 431
Fig. 432
Fig. 433
Fig. 438
Fig. 439

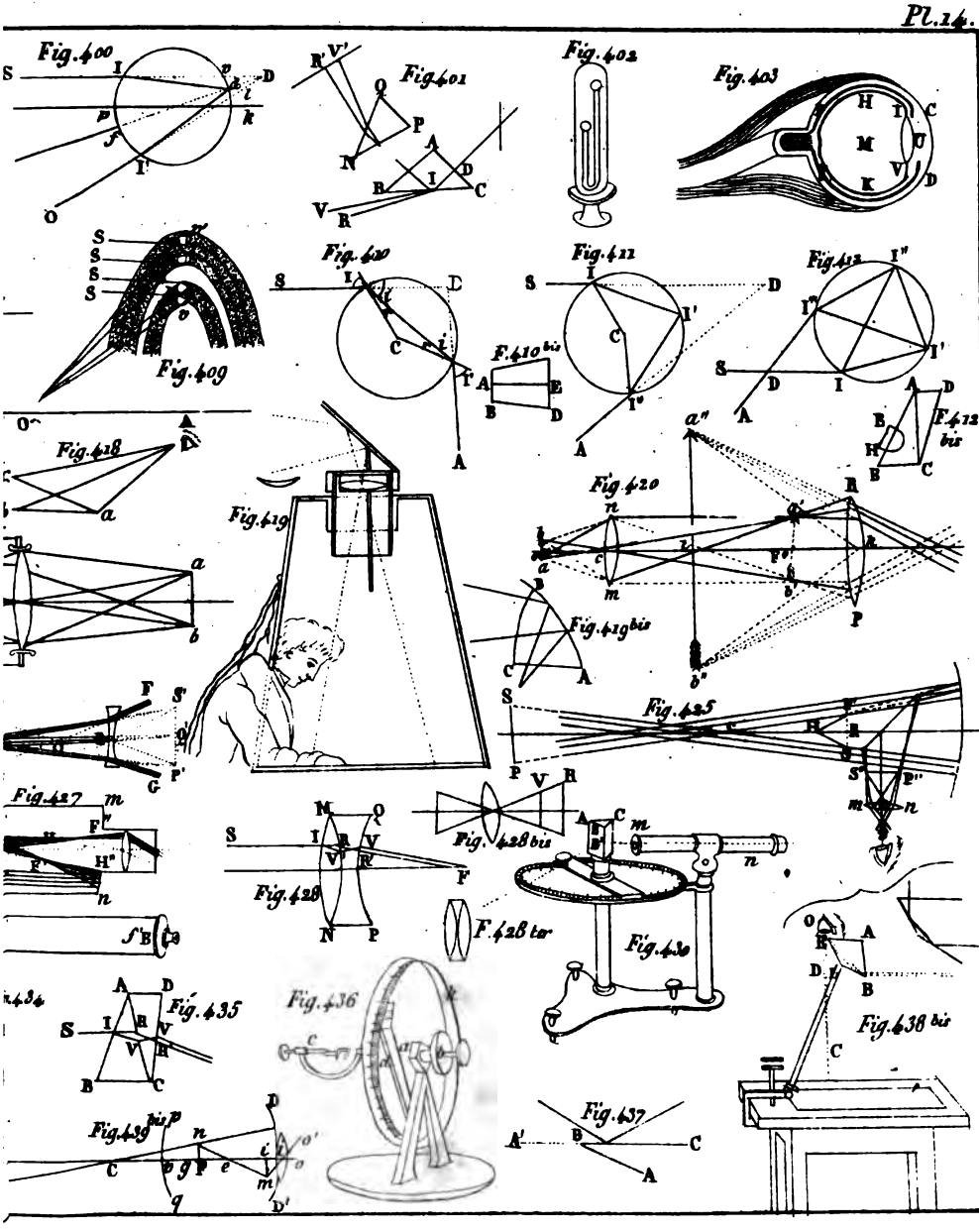


Fig. 400
Fig. 401
Fig. 402
Fig. 403
Fig. 409
Fig. 410
F. 410 bis
Fig. 411
Fig. 412
F. 412 bis
Fig. 418
Fig. 419
Fig. 419 bis
Fig. 420
Fig. 425
Fig. 427
Fig. 428
Fig. 428 bis
F. 428 ter
Fig. 430
Fig. 435
Fig. 436
Fig. 437
Fig. 438 bis
Fig. 439 bis

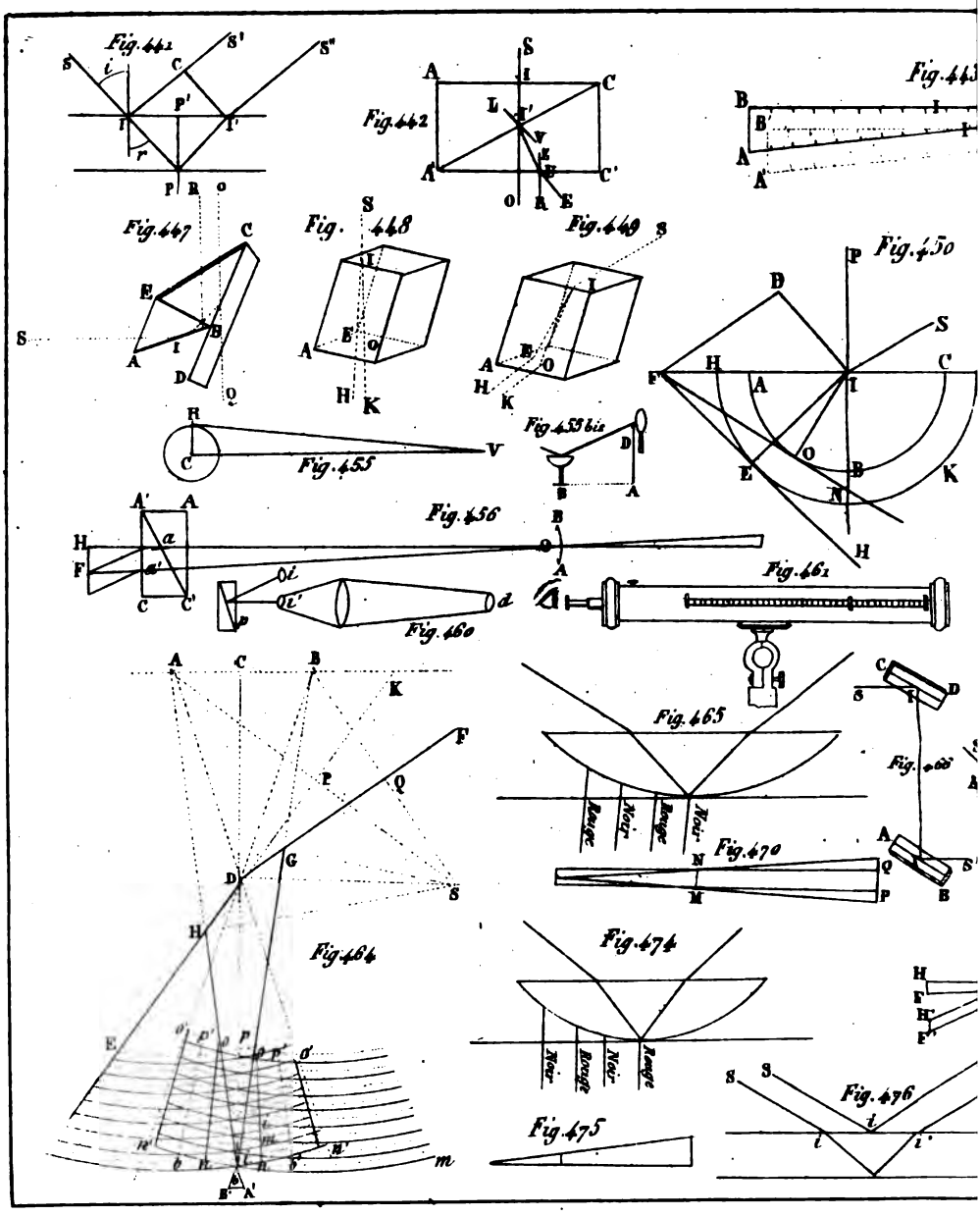


Fig. 441
Fig. 442
Fig. 443
Fig. 447
Fig. 448
Fig. 449
Fig. 450
Fig. 455
Fig. 455 bis
Fig. 456
Fig. 460
Fig. 461
Fig. 464
Fig. 465
Fig. 466
Fig. 470
Fig. 474
Fig. 475
Fig. 476
Rouge
Noir
Rouge
Noir

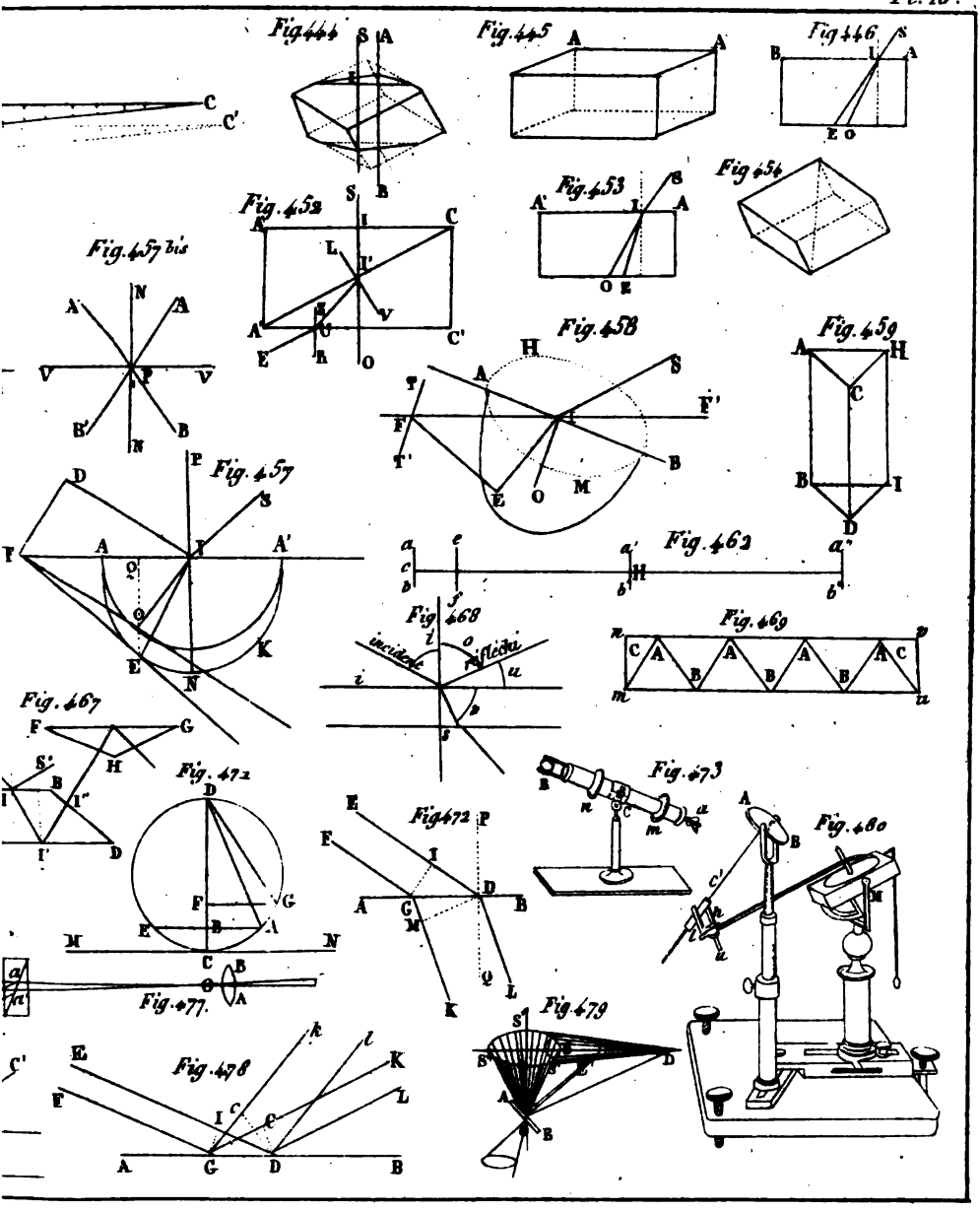


Fig. 444
Fig. 445
Fig. 446
Fig. 453
Fig. 454
Fig. 452
Fig. 457 bis
Fig. 458
Fig. 459
Fig. 457
Fig. 462
Fig. 468
incidente
riflessa
Fig. 469
Fig. 467
Fig. 472
Fig. 473
Fig. 480
Fig. 477.
Fig. 478
Fig. 479

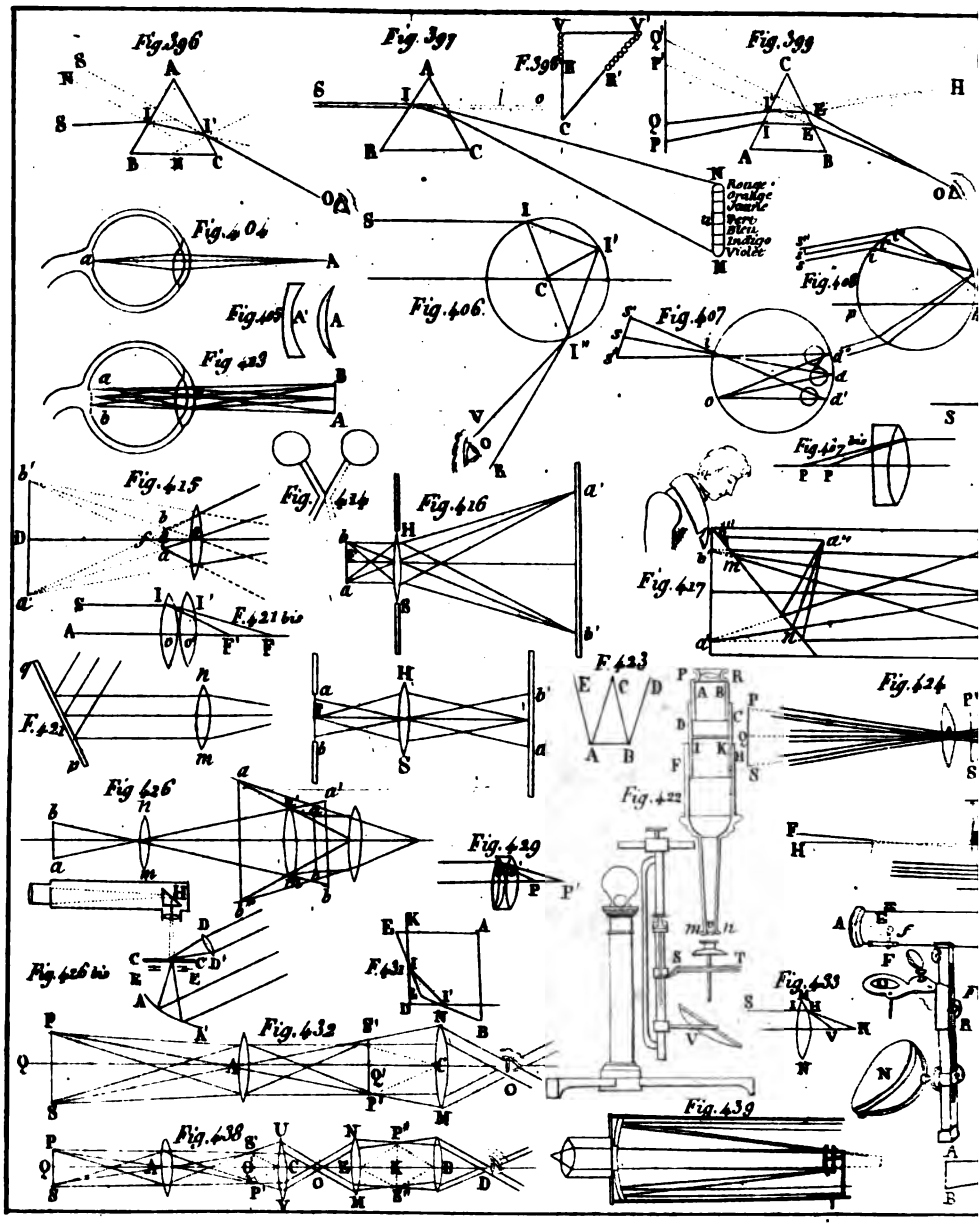


Fig. 396
Fig. 397
F. 398
Fig. 399
Rouge
orange
Jaune
Vert
Bleu
Indigo
Violet
Fig. 404
Fig. 405
Fig. 406
Fig. 407
Fig. 408
Fig. 423
Fig. 415
Fig. 414
Fig. 416
Fig. 417 bis
Fig. 417
F. 421 bis
F. 421
F. 423
Fig. 424
Fig. 422
Fig. 426
Fig. 429
Fig. 426 bis
F. 431
Fig. 432
Fig. 433
Fig. 438
Fig. 439

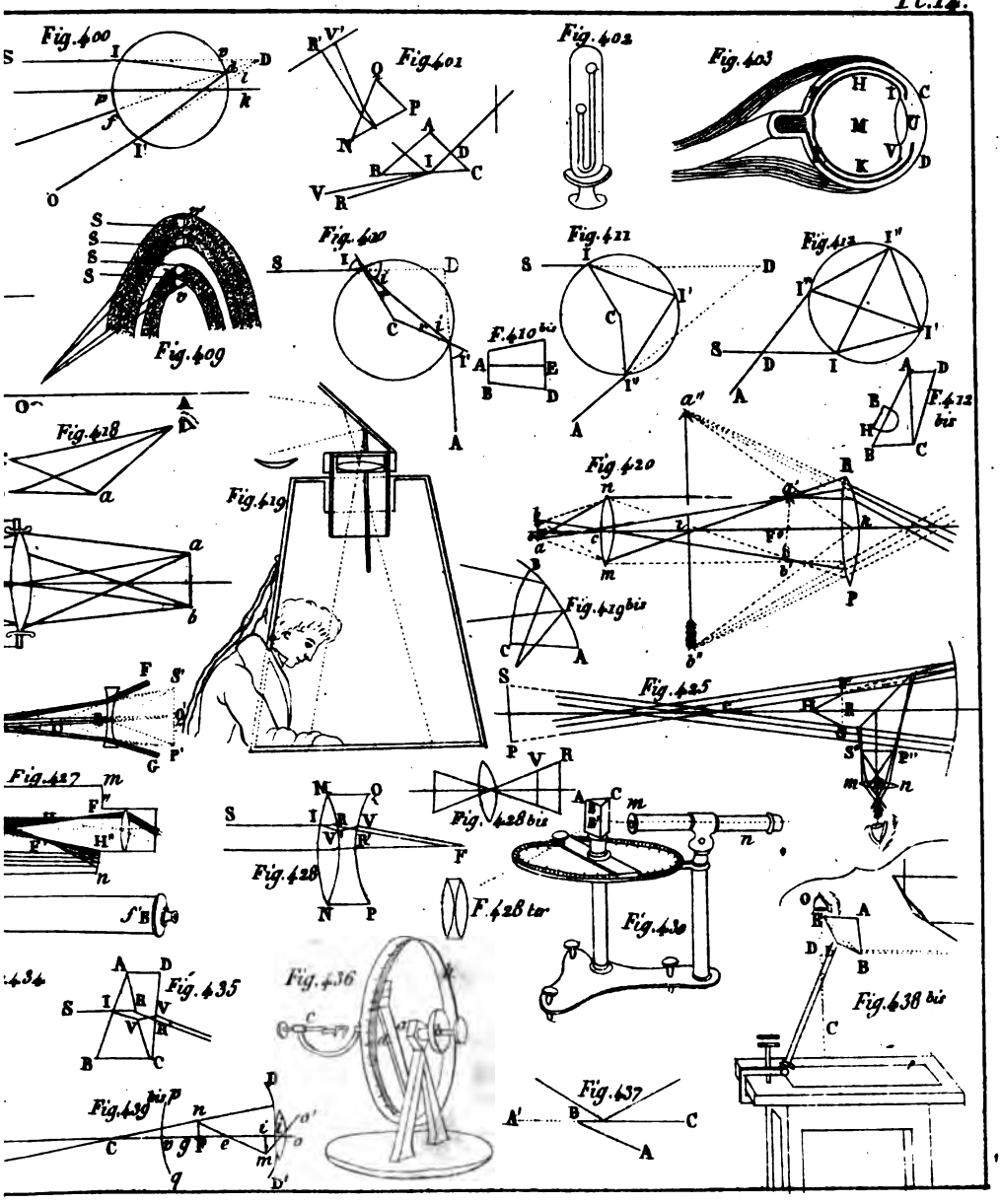


Fig. 400
Fig. 401
Fig. 402
Fig. 403
Fig. 409
Fig. 410
Fig. 410 bis
Fig. 411
Fig. 412
Fig. 412 bis
Fig. 418
Fig. 419
Fig. 419 bis
Fig. 420
Fig. 425
Fig. 427
Fig. 428
Fig. 428 bis
Fig. 428 ter
Fig. 430
Fig. 434
Fig. 435
Fig. 436
Fig. 437
Fig. 438 bis
Fig. 439 bis

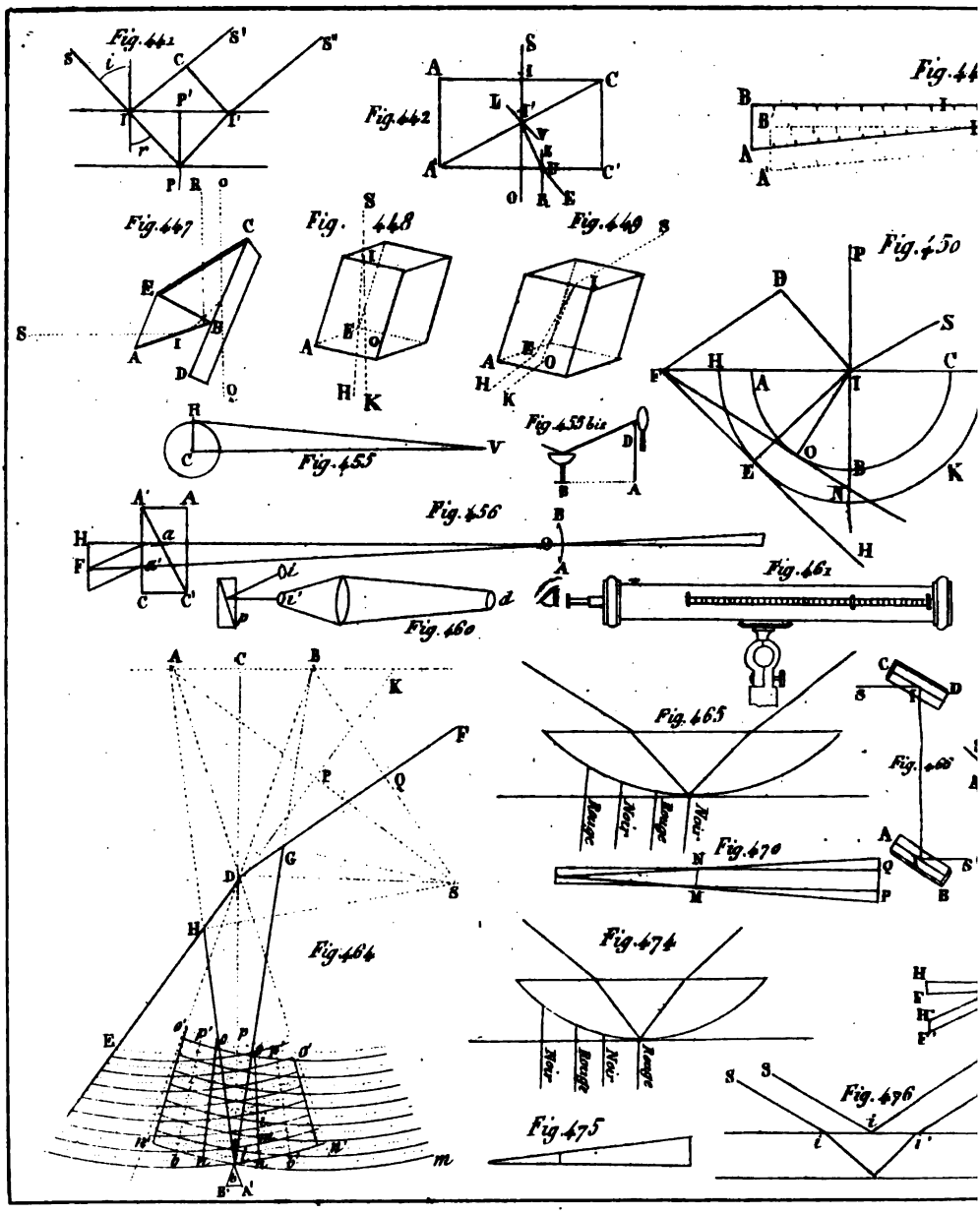


Fig. 441
Fig. 442
Fig. 447
Fig. 448
Fig. 449
Fig. 450
Fig. 455
Fig. 453 bis
Fig. 456
Fig. 460
Fig. 461
Fig. 464
Fig. 465
Fig. 466
Fig. 470
Fig. 474
Fig. 475
Fig. 476
Rouge
Noir
Rouge
Noir

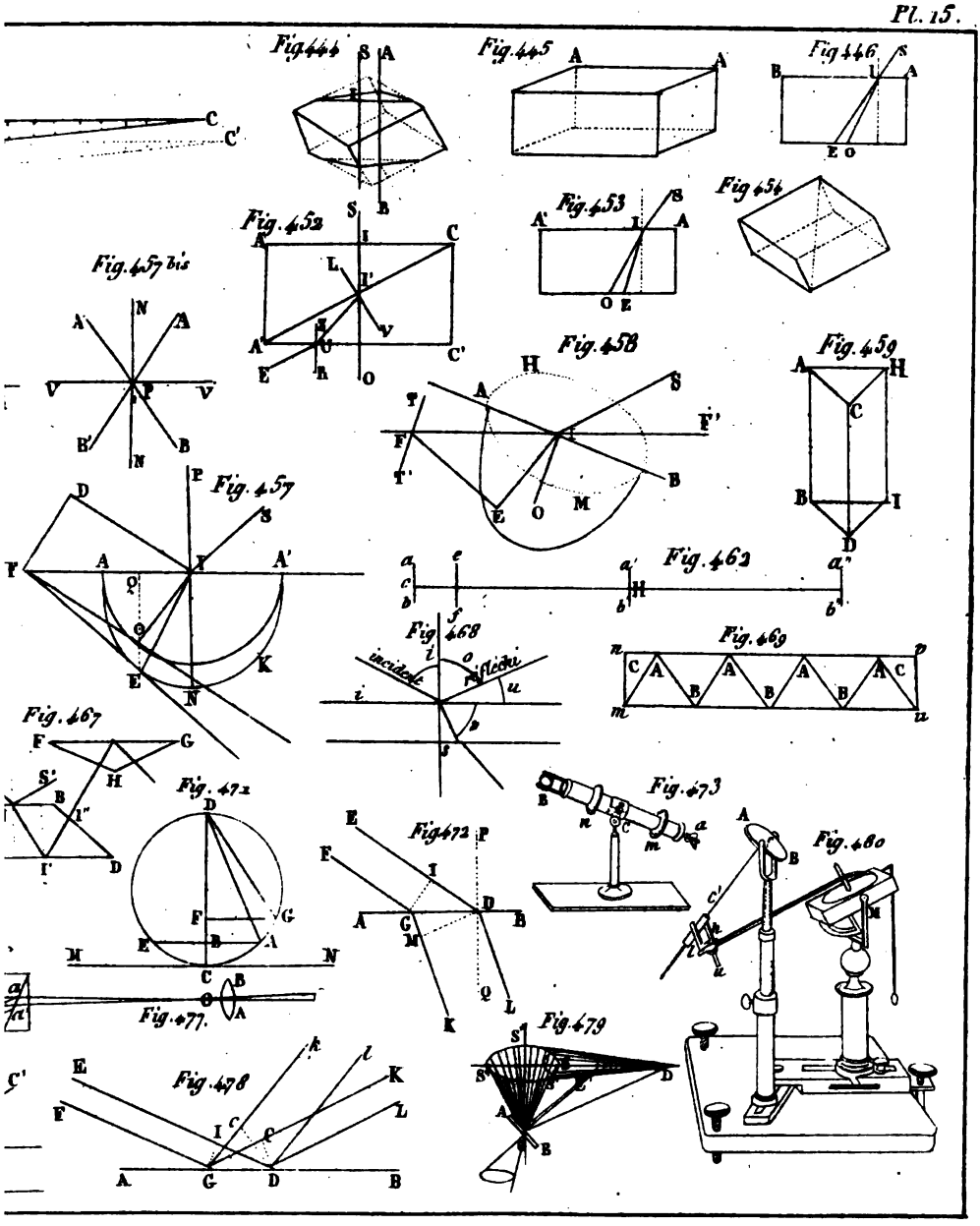
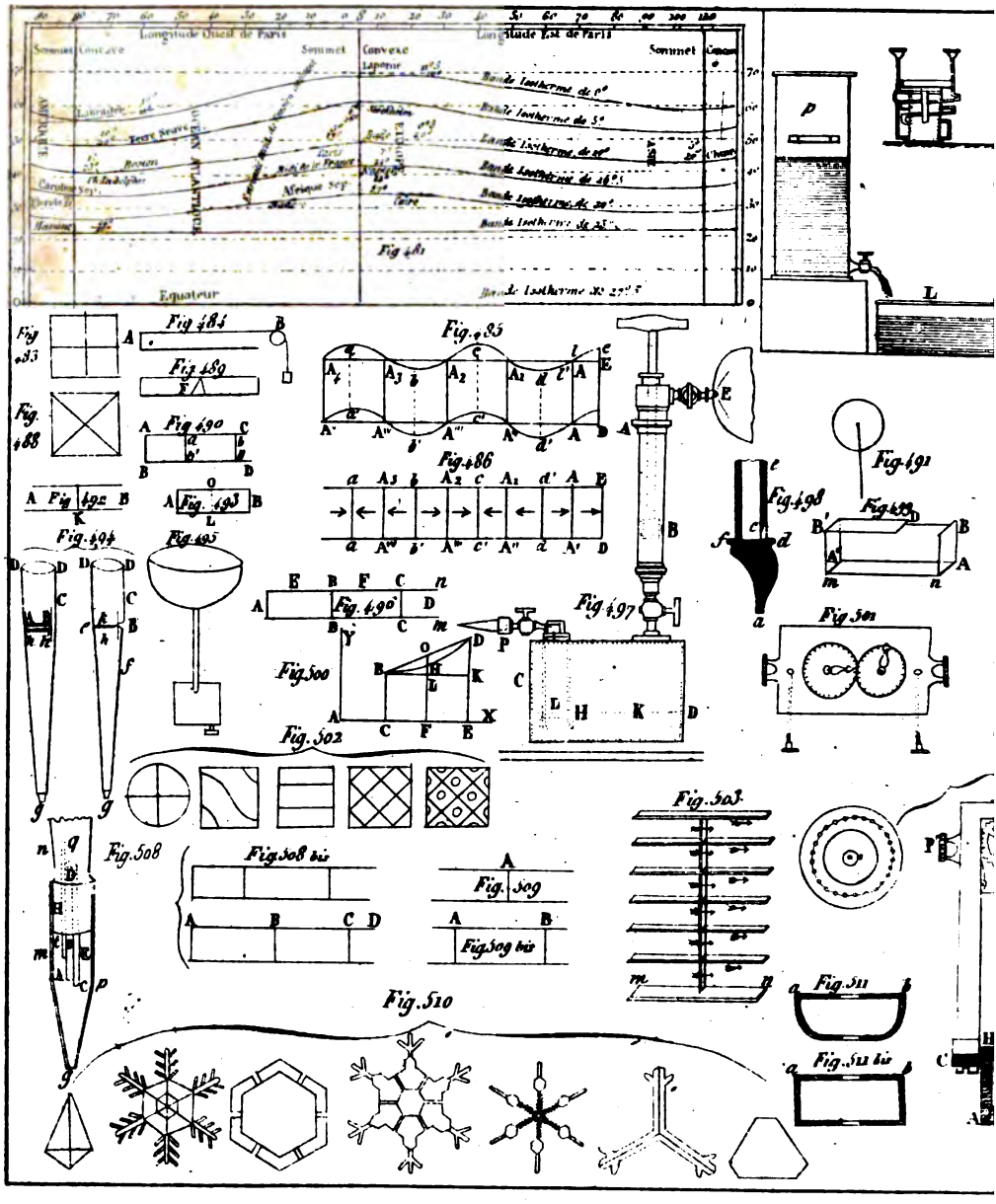


Fig. 444
Fig. 445
Fig. 446
Fig. 452
Fig. 453
Fig. 454
Fig. 457 bis
Fig. 458
Fig. 459
Fig. 457
Fig. 462
Fig. 468
incident
reflechi
Fig. 469
Fig. 467
Fig. 472
Fig. 473
Fig. 480
Fig. 477.
Fig. 478
Fig. 479


Longitude Ouest de Paris
Longitude Est de Paris
Sommet
Convexe
Laponie
Bande Isotherme de 0°
Bande Isotherme de 5°
Bande Isotherme de 10°
Bande Isotherme de 15°
Bande Isotherme de 20°
Bande Isotherme de 25°
Afrique
Terre
Equateur
Fig 481
Fig 483
Fig 484
Fig 485
Fig 486
Fig 488
Fig 489
Fig 490
Fig 491
Fig 492
Fig 493
Fig 494
Fig 495
Fig 496
Fig 497
Fig 498
Fig 499
Fig 500
Fig 501
Fig 502
Fig 503
Fig 508
Fig 508 bis
Fig 509
Fig 509 bis
Fig 510
Fig 511
Fig 512 bis

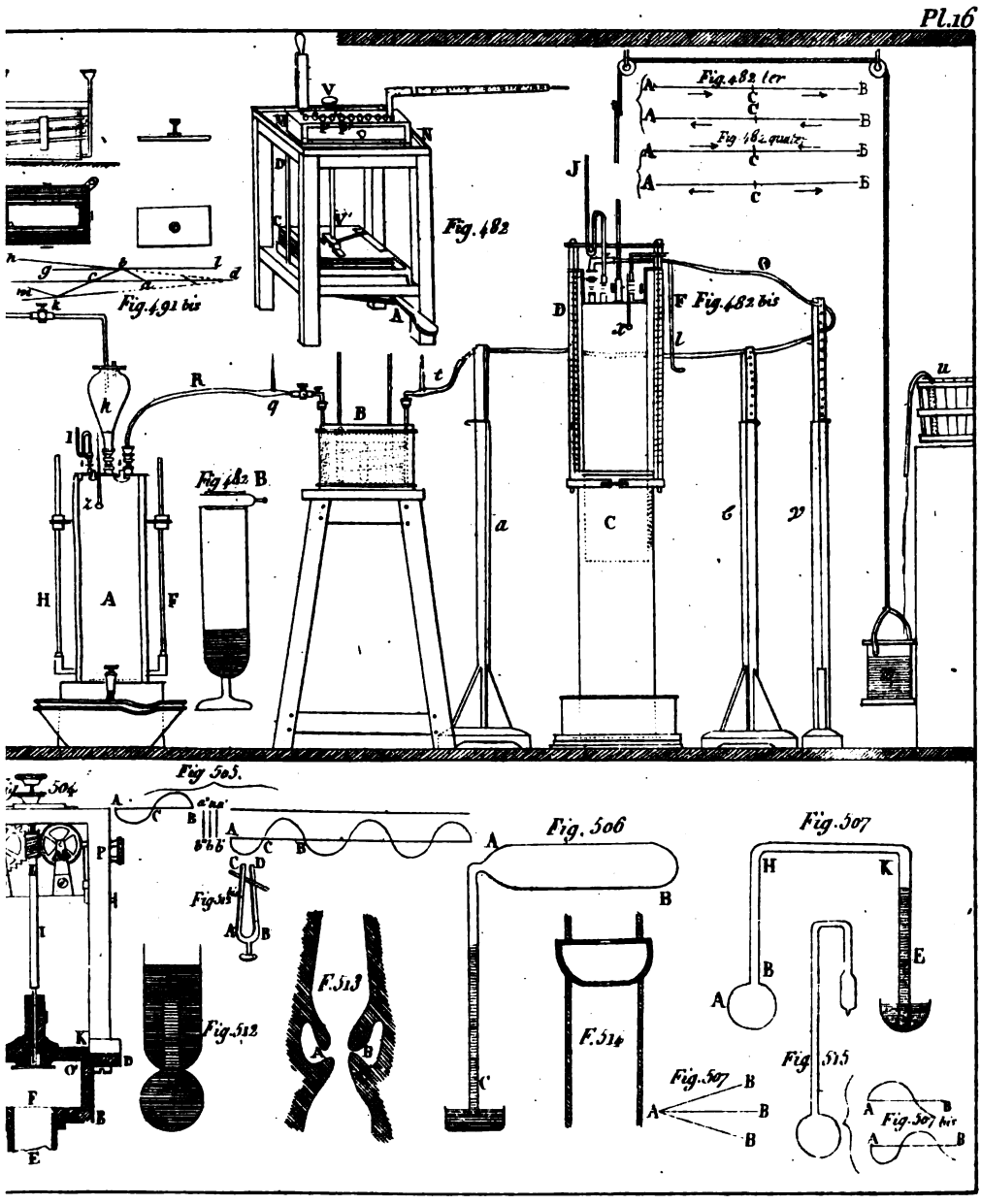
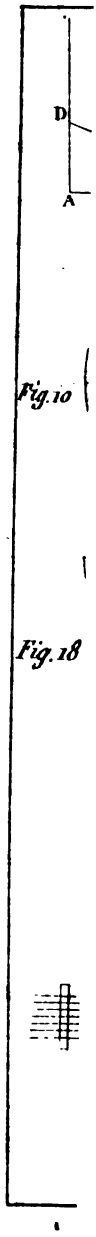


Fig.482
Fig.482 bis
Fig.482 B
Fig.482 1er
Fig.482 quatr.
Fig.491 bis
Fig.504
Fig.505
Fig.506
Fig.507
Fig.507 bis
Fig.508
Fig.512
F.513
F.514
Fig.515


D
A
Fig. 10
Fig. 18

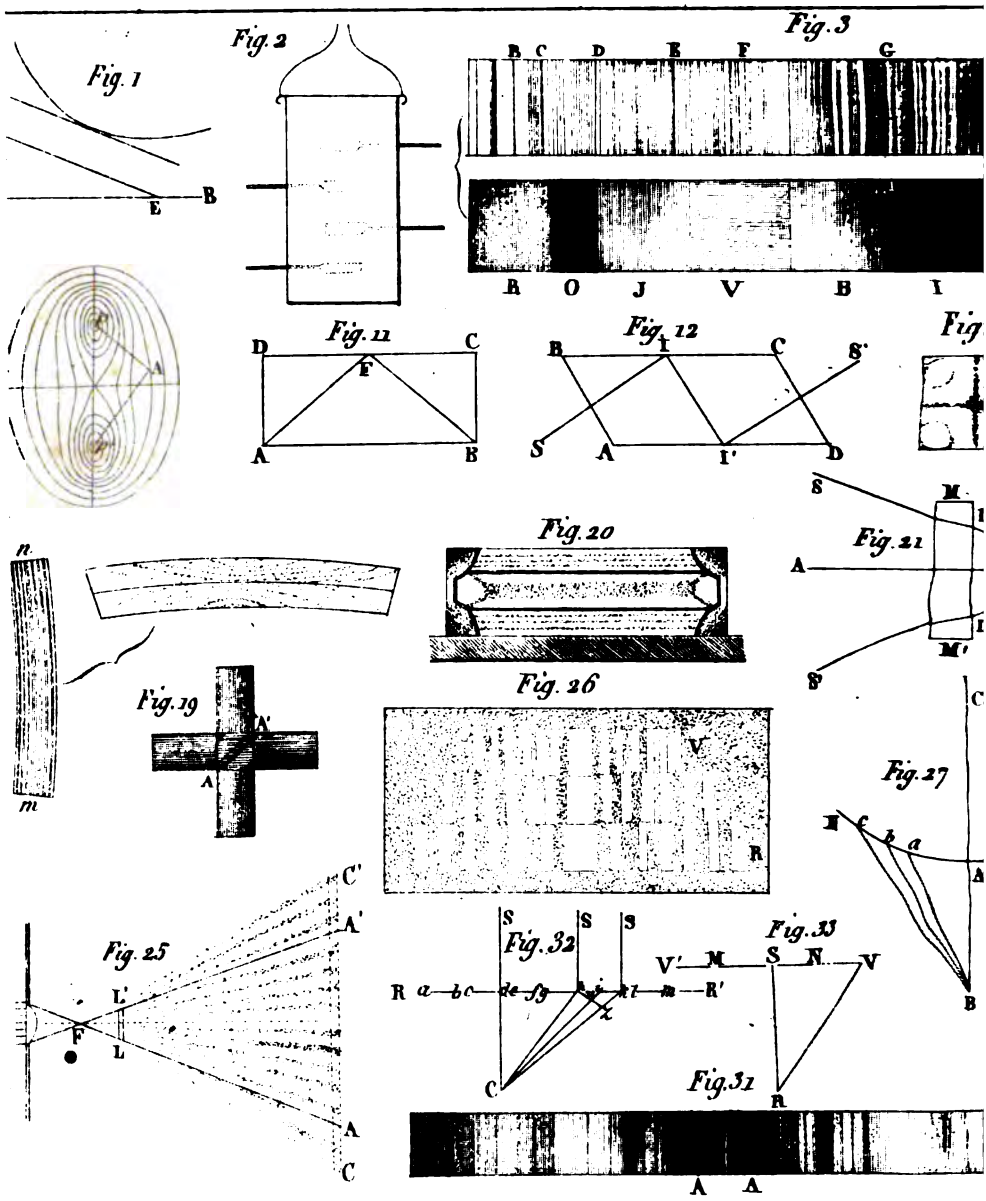


Fig. 1
E
B
Fig. 2
Fig. 3
B C D E F G
R O J V B I
Fig. 11
D C
F
A B
Fig. 12
B I C S'
S A I' D
Fig
S
M
I
A
I
M'
S'
Fig. 21
Fig. 20
n
m
Fig. 19
A'
A
Fig. 26
V
R
Fig. 27
C
I c b a
A
B
C'
A'
Fig. 25
L'
F
L
A
C
S S S
Fig. 32
R a b c d e f g h i k l m R'
C
V' M S N V
Fig. 33
R
Fig. 31
A A

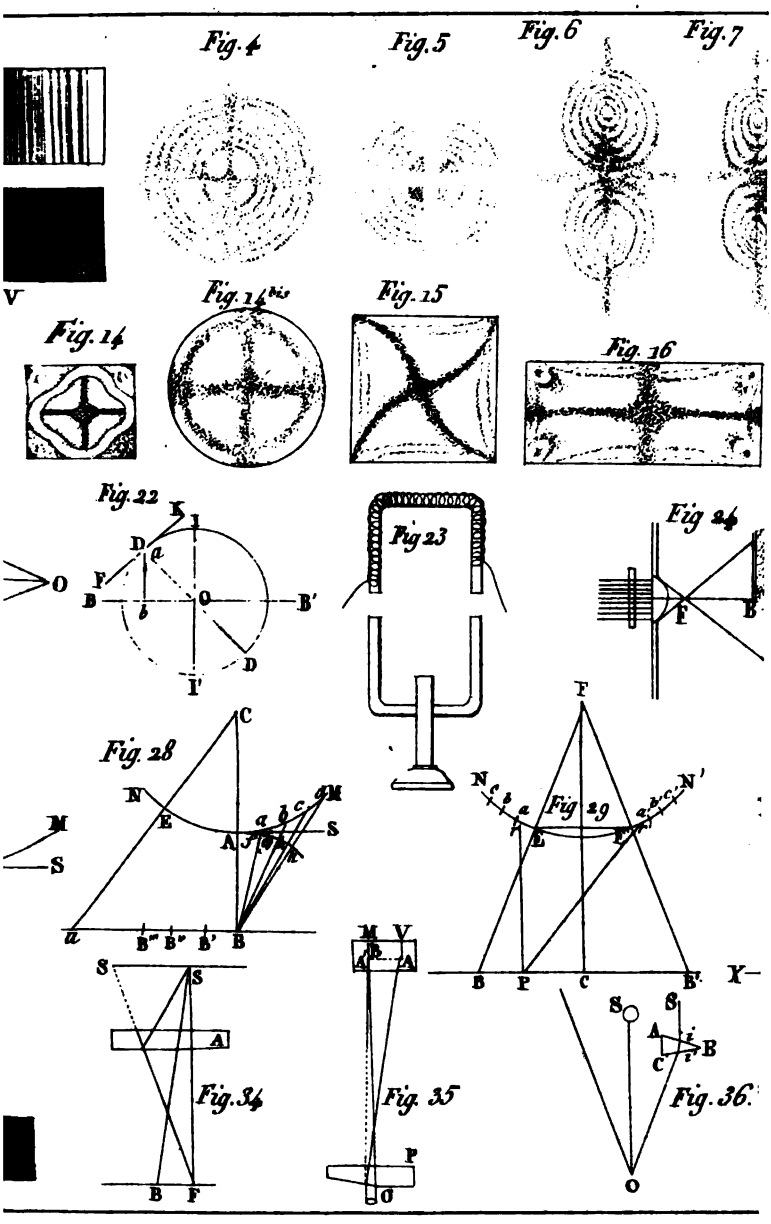


Fig. 4
Fig. 5
Fig. 6
Fig. 7
V
Fig. 14
Fig. 14 bis
Fig. 15
Fig. 16
Fig. 22
Fig 23
Fig 24
Fig. 28
Fig 29
Fig. 34
Fig. 35
Fig. 36

Acme
Bookbinding Co., Inc.
100 Cambridge St.
Charlestown, MA 02129

Cabot Science 00387241
3 2044 091 842 799